Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

STATISCHE HÄRTE- UND FESTIGKEITSPRÜFUNGEN ZAHNÄRZTLICHER SILBERAMALGAME

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Klinische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Karl-Heinz Diefenbacher
aus
Pforzheim

1978

Digitized by the Internet Archive
in 2026

https://archive.org/details/IA41523714_0028

Aus der Abteilung für Zahnerhaltung
Ärztlicher Direktor: Professor Dr. Dr. P. Riethe
des Zentrums für Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde
der Universität Tübingen

STATISCHE HÄRTE- UND FESTIGKEITSPRÜFUNGEN ZAHNÄRZTLICHER SILBERAMALGAME

Inaugural-Dissertation
zur Erlangung des Doktorgrades
der Zahnheilkunde

dem Fachbereich Klinische Medizin
der Eberhard-Karls-Universität
zu Tübingen

vorgelegt von
Karl-Heinz Diefenbacher
aus
Pforzheim

1978

UNIV.
LEIDEN
BIBL.

Dekan: Professor Dr. H.-E.Hoffmeister

1. Berichterstatter: Professor Dr.Dr. P.Riethe

2. Berichterstatter: Professor Dr. W.Prandl

FOTODRUCK H. RESCH · Georgstr. 50 · 7402 Kirchentellinsfurt

Meiner Frau

INHALTSVERZEICHNIS

		Seite
1.	EINLEITUNG	1
2.	MATERIAL	4
2.1	Standalloy F voramalgamiert	5
2.2	Standalloy voramalgamiert	5
2.3	Standalloy F nicht voramalgamiert	5
2.4	Standalloy nicht voramalgamiert	5
2.5	Luxalloy non gamma 2	5
2.6	A-76 non gamma 2	8
2.7	Shofu Spherical Zinc λ	8
2.8	Shofu Spherical non Zinc 8 M	8
2.9	True Dentalloy a cut	8
2.10	True Dentalloy Zinc free	8
3.	HERSTELLUNG DER AMALGAM-PROBEKÖRPER	9
4.	STATISCHE HÄRTEPROFUNG NACH VICKERS	13
4.1	Versuchsdurchführung	14
5.	STATISCHE FESTIGKEITSPROFUNGEN	15
5.1	Druckfestigkeit	17
5.1.1	Versuchsdurchführung	19
5.1.2	Spannungs- Stauchungskurven der 10 Amalgamsorten	20
5.2	Tensile strength	22
5.2.1	Versuchsdurchführung	26
5.2.2	Spannungs- Pressungslinien der 10 Amalgamsorten	27
5.3	Biegefestigkeit	28
5.3.1	Versuchsdurchführung	35
5.3.2	Spannungs- Durchbiegungsschaubild	39

Seite

6. STATISTISCHE AUSWERTUNGEN 40

6.1 Ermittlung der Ausreißer 41

6.2 Mittelwerte $\bar{x}$ 42

6.3 Berechnung der Standardabweichung 42

6.4 Der statistische Test 45

6.5 Test auf Normalverteilung 46

6.6 Test auf Homogenität der Varianzen 48

6.7 Die Mittelwertvergleiche nach der parametrischen oder klassischen Methode 50

6.7.1 Varianzanalyse 52

6.7.2 Der Scheffé-Test 54

6.8 Die Mittelwertvergleiche nach der parameterfreien oder verteilungsfreien Methode 63

6.8.1 Der H-Test von KRUSKAL und WALLIS 63

6.8.2 Der U-Test von WILCOXON, MANN und WHITNEY 65

6.9 Zusammenfassung der statistischen Auswertungen 71

7. INWIEFERN GEBEN DIE VIER PROFMETHODEN DIE KLINISCHEN VERHÄLTNISSE WIEDER, UND WAS SAGEN SIE OBER DIE HALTBARKEIT DER AMALGAMFOLLUNG IM MUNDE AUS? 73

7.1 Vickershärte 73

7.2 Druckfestigkeit 73

7.3 Tensile strength 78

7.4 Biegefestigkeit 86

7.4.1 Der Biegeversuch und die "Gamma 2"-freien Amalgame 95

8. ZUSAMMENFASSUNG 98

9. LITERATURVERZEICHNIS 100

1. EINLEITUNG

Amalgam ist ein Werkstoff, der zum Füllen von Kavitäten dient. Vor Gebrauch wird die Feilung, die nach der FDI-Specification Nr. 1 (24) aus mindestens 65 % Silber bestehen soll und maximal 29 % Zinn, 6 % Kupfer, 2 % Zink und 3 % Quecksilber enthalten darf, mit Quecksilber im allgemeinen im Verhältnis 1:1 vermischt. In Deutschland wird das "Metallpulver" unkorrekterweise als Amalgam bezeichnet; in England und in den USA spricht man von "Dental-Alloy" oder von "Alloy for Amalgam".

Nach P.RIETHE (23) ist der Name "Amalgam", wie schon LIBAVIUS anführt (zit.n. KOPP, H. (1847), "aus dem griechischen Wort *'μάλαγμα'* (erweichende Salber, Pflaster) abzuleiten und über das syr. mālagmā ins Arabische gekommen, wo man den arabisch anmutenden Ausdruck (al-) malḡam oder (al-) mulḡam mit der Wurzel laḡama zusammenbrachte und davon die neuen Verbalnomina Aalḡum und ilḡām für 'Amalgamierung' bildete" ...

"Wo die Bildung der Amalgame und die Löslichkeit der Edelmetalle in Quecksilber entdeckt wurde, ist nicht bekannt, doch dürfte es in Kleinasien oder in Ägypten geschehen sein" ... (LIPPMANN, E.O.v. (1919, 1954) zit.n. REX, F. (1960)).

Die wissenschaftliche Erforschung der Silber-Zinn-Legierungen begann in Amerika mit BLACK (24), der die ersten Materialprüfungen im Laboratorium durchführte. BLACK fand, daß sich die Qualität eines Amalgames in hohem Maße verbesserte, wenn die Feilung sechs Monate lang der Sonnenwärme ausgesetzt war (künstliches Altern einer Feilung). Ferner erkannte er, daß die qualitativen Verschiedenheiten ein und desselben Amalgames durch die Verschiedenheit der Feilung verursacht wurden.

Seine genauen Untersuchungen der Silber-Zinn-Legierungen in verschiedener Zusammensetzung brachten die Erkenntnis, daß der Silbergehalt einen wesentlichen Einfluß auf das Volumenverhalten und die Fließerscheinungen des Amalgames hat.

In Deutschland hat sich zu jener Zeit besonders A.WITZEL um die Amalgamforschung verdient gemacht. Dieser und G.V. BLACK kamen zu der Erkenntnis, daß die Güte und Dauerhaftigkeit einer Amalgamfüllung nicht nur von den Eigenschaften der Silber-Zinn-Feilung abhängen, sondern in gleichem Maße von der Arbeitsweise des Zahnarztes, die beim Hersteller einer Amalgamfüllung nicht sorgfältig genug sein kann. Aus jener Zeit stammt der Satz: "The manufacturer makes the alloy, the dentist makes the amalgam" (14).

Im Jahre 1931 wurden in den USA Qualitätsvorschriften für Zahnamalgame erlassen, deren Anerkennung durch die "American Dental Association (ADA)" 1934 erfolgte (24). Heute kennen wir mehrere Qualitätsvorschriften für Amalgame, die in verschiedenen Spezifikationen zusammengefaßt sind, so die FDI-Spezifikation Nr. 1 für Europa (24), die ADA-Specification Nr. 1 für die USA (1), die Standard-Specification for Dental Amalgam Alloy in Australien (27), die British Standard-Specification of Alloy for Dental Amalgam (4) und die Deutsche Norm DIN 13904 vom August 1975 (5), die mit der ADA-Specification Nr. 1 fast identisch ist.

Amalgam ist gegenwärtig noch der meistverarbeitete Füllstoff in der Zahnerhaltungskunde. Die Anwendung und Auswertung physikalischer Testmethoden sorgen für eine ständige Verbesserung dieses bevorzugten Werkstoffes, mit dem der Zahnarzt verloren gegangene Zahnhartsubstanzen dauerhaft ersetzen kann.

Bei den in der vorliegenden Arbeit durchgeführten physikalischen Testmethoden handelt es sich um die Ermittlung der Vickershärte, der statischen Druck- und Biegefestigkeit und um die "tensile strength" der einzelnen Amalgamsorten.

Die Probekörper lagerten nach fachgerechter Herstellung bei einer Temperatur von $(37 \pm 1)°$ C 7 Tage im Wärmeschrank, um ihre Endhärte annähernd zu erreichen.

Die Härte- bzw. Festigkeitsprüfung sieben Tage nach Herstellung der Probekörper wird in den aufgeführten Spezifikationen nicht verlangt. Ebenso haben die Biegefestigkeitsprüfung und die Härteprüfung nach VICKERS in diesen Spezifikationen bis jetzt keine Berücksichtigung gefunden. Laut ADA-Specification Nr. 1 soll der Verformungsversuch "tensile strength" 15 Minuten nach Herstellung der Probekörper erfolgen (1). Die Deutsche Norm DIN 13904 fordert die Prüfung der Druckfestigkeit nach 60 Minuten bzw. 24 Stunden (5), und die Australien Standard Specification gibt an, daß die Druckfestigkeit des Amalgams nicht weniger als 6 kp/mm^2 60 Minuten nach der Kondensation betragen soll (27). Dagegen findet die Druckfestigkeit in der FDI-Spezifikation Nr. 1 und in der British Standard-Specification of Alloy for Dental Amalgam keine Erwähnung (4, 24). In diesen beiden Spezifikationen begnügt man sich mit der Flow-Messung; weitere Härte- oder Festigkeitsprüfungen werden nicht verlangt.

Sinn und Zweck dieser Arbeit ist es nun herauszufinden, ob die Laboratoriumstests Vickershärte, Druck- und Biegefestigkeit und "tensile strength" sieben Tage nach Herstellung der Probekörper für die klinischen Verhältnisse von Bedeutung sind.

Amalgamsorte	Chargennummer	Hersteller	Mischverhältnis Hg : Alloy	Mischzeit im Dentomat
Standalloy F voramalgamiert	20 371	Degussa Pforzheim	1 : 1	30 sec
Standalloy voramalgamiert	20 211	Degussa Pforzheim	1 : 1	20 sec
Standalloy F nicht voramalg.	40 055	Degussa Pforzheim	1,2 : 1	30 sec
Standalloy nicht voramalg.	40 151	Degussa Pforzheim	1,2 : 1	30 sec
Luxalloy non gamma 2	40 326	Degussa Pforzheim	1,2 : 1	30 sec
A-76 non gamma 2	Versuchscharge vom 2.8.1976	Degussa Pforzheim	1 : 1	30 sec
Shofu Spherical Zinc λ	30	Shofu Dent.Mfg. Co.,LTD.Japan	0,82 : 1	20 sec
Shofu Spherical non Zinc 8 M	420	Shofu Dent.Mfg. Co.,LTD.Japan	0,82 : 1	20 sec
True Dentalloy A cut	926 939	S.S. White Dent. Mfg.Co.LTD.GB	1,2 : 1	30 sec
True Dentalloy Zinc free	03 047 205	S.S. White Dent. Mfg.Co.LTD.USA	1,2 : 1	30 sec

Tab. 1

2.1 Standalloy F voramalgamiert (alt)

Das Alloy ist zinkfrei und mit etwa 1,5 % Quecksilber voramalgamiert. Der Silbergehalt beträgt 70 %. Das Amalgam ist schnellhärtend (Verarbeitungszeit 10-13 min.). Die Feilungspartikel haben eine feinspanige Form von max. 20 µm.

2.2 Standalloy voramalgamiert (alt)

Zinkfreies Alloy, das ebenfalls mit etwa 1,5 % Quecksilber voramalgamiert ist. Es ist kein feinspaniges Alloy, der Silbergehalt beträgt 68 % und die Verarbeitungszeit 13-15 min.

2.3 Standalloy F nicht voramalgamiert (neu)

Entspricht im allgemeinen Standalloy F voramalgamiert. Das Alloy enthält kein Quecksilber, da ab 1976 die Voramalgamierung nicht mehr vorgenommen wird.

2.4 Standalloy nicht voramalgamiert (neu)

Entspricht im allgemeinen Standalloy voramalgamiert, enthält aber ebenfalls kein Quecksilber mehr.

2.5 Luxalloy non gamma 2

Der Silbergehalt des Pulvers dieses neuen Werkstoffes für die Zahnerhaltungskunde beträgt 70 %. Die Verarbeitungszeit wird mit 8-10 min. angegeben. Das Alloy setzt sich zu 70 % aus gefrästen Spänen und zu 30 % aus kugeligen Partikeln zusammen, die durch direktes Zerstäuben einer geschmolzenen Ag-Cu-Legierung gewonnen werden. Die Kugelkomponente erhöht die Geschmeidigkeit des Amalgames und verhindert die Bildung der γ_2-Phase.

Für die chemische Abbindereaktion zwischen Alloy und Quecksilber gilt folgende Formel:

$$7\ Ag_3Sn + 29\ Hg \longrightarrow 7\ Ag_3Hg_4 + Sn_7Hg$$
$$\gamma \qquad\qquad \gamma_1 \qquad \gamma_2$$

MAHLER und Mitarbeiter (19) haben in den USA diese Formel inzwischen korrigiert und die γ_1-Phase mit $Ag_{22}Hg_{51}Sn_9$, die γ_2-Phase mit Sn_8Hg angegeben. Die γ_2-Phase mit dem hohen Gehalt an unedlem Zinn stellt die schwächste der drei Phasen dar. Gerade das relativ unedle Zinn ist am korrosionsanfälligsten, und somit bestimmt die γ_2-Phase das Korrosionspotential des ganzen Amalgames.
Das Sn der γ_2-Phase oxidiert, der Hg-Anteil bleibt in metallischer Form zurück und diffundiert mit der Zeit in die Füllung hinein, wo es erneut mit restlichem Ag_3Sn reagieren kann. Das führt zu einer lokalen Expansion des Amalgames an den Stellen der Füllung, wo die Hg-Atome hinwandern. Dieser Vorgang spielt sich in erster Linie in der Gegend der Schmelz-Füllungsgrenze ab. Dadurch kommt es zu einem Herausquellen der Füllungsränder, die abgebogen werden und zu einer Spaltverbreiterung führen, weil innen liegende Amalgamschichten dieser Bewegung entgegentreten.
Die Folgen waren Sekundärkaries, und die Haltbarkeit der Füllung aus herkömmlichem Amalgam war zeitlich eng begrenzt. Mit der Schaffung der "Gamma 2-freien Amalgame" wurde ein neues Zeitalter in der Geschichte des Amalgames eingeleitet, um einen dauerhafteren Kavitätenverschluß zu gewährleisten.

1963 mischten INNES und YOUDELIS (11) handelsüblichem Alloy ein Legierungspulver aus Ag-Cu-Eutektikum in Anteilen bis zu 33 % bei. Es zeigte sich eine Abnahme des Flows (= Fließneigung) und die ERHÖHUNG DER DRUCKFESTIGKEIT. Das Ag-Cu-Legierungspulver wurde später in Form von verdüsten Kugeln dem herkömmlichen Alloy beigemengt.
Entscheidend für die Qualitätsverbesserung des Amalgames war das Verschwinden der γ_2-Phase nach Abschluß des Erhärtens.

Die beigemischten Ag-Cu-Kugeln wurden von der intermetallischen Verbindung $Cu_6Sn_5\eta'$ umhüllt. Das freigesetzte Sn stammt vom Ag_3Sn und hat sich nicht mit Hg verbunden, sondern mit einem Teil des aus den Ag-Cu-Kugeln stammenden Cu. Damit ist die γ_2-Phase verschwunden und eine korrosions-chemische Edlere entstanden (16).

Aufbau des "Gamma 2-freien Amalgames":

Ag (mit Cu), α_1
Cu (mit Ag), α_2 } restliche Ausgangskugeln

Ag_3Sn, γ , Hauptbestandteil
Cu_3Sn, ε , Nebenbestandteil } der restlichen Ausgangsfeilung

Ag_3Hg_4 bzw. $Ag_{22}Hg_{27}Sn$, γ_1 Matrix und kleinerer Anteil in der Umhüllungszone

Cu_6Sn_5, η' , Hauptanteil der Umhüllungszone (16)

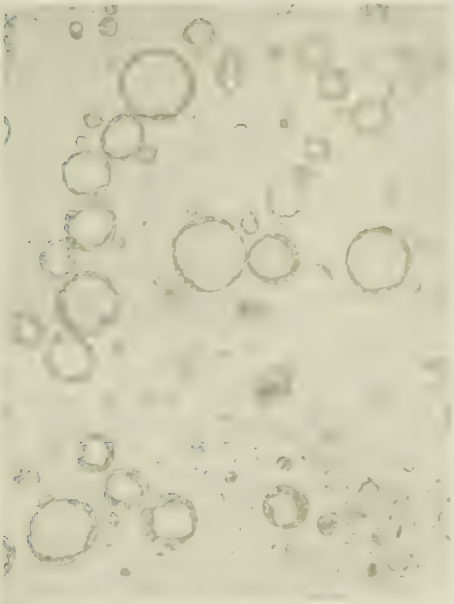

Abb. 1:
Luxalloy non gamma 2 mit Cu_6Sn_5-Phase
(Maßstab: 400:1)

2.6 A-76 non gamma 2

Es handelt sich um ein gamma 2-freies Versuchsamalgam mit über 80 % Ag, das zu 80 % aus hoch-Ag-haltigen Kugeln und zu 20 % aus Feilung konventioneller Zusammensetzung besteht.*

2.7 Shofu Spherical Zinc λ

Reines Kugelamalgam.

2.8 Shofu Spherical non Zinc 8 M

Reines Kugelamalgam, zinkfrei.

2.9 True Dentalloy a cut

Grobspaniges Amalgam, zinkhaltig.

2.10 True Dentalloy Zinc free

Grobspaniges Amalgam, zinkfrei.

---

* Privatmitteilung von R.Kropp, Degussa - Pforzheim

3. HERSTELLUNG DER AMALGAM-PROBEKÖRPER

Die Probekörper für die Ermittlung der Vickershärte und Druckfestigkeit der einzelnen Amalgamsorten wurden nach der Deutschen Norm DIN 13904 vom August 1975 (5) gestopft und hergestellt, die Probekörper für die Ermittlung der "tensile strength" nach der ADA-Specification Nr. 1 (1). Wegen der statistischen Auswertungen wurden die Messungen an jeweils 10 Probekörpern anstatt 5 pro Amalgamsorte vorgenommen. Das Alloy wurde mit Hilfe einer Sartorius-Analysenwaage abgewogen ($\pm$ 0,1 mg) und das Quecksilber mit einem Degussa-Quecksilberdosierer dosiert ($\pm$ 1 mg).

Abb. 2:
Stopfgerät und Stopfform

Abb. 3:
Stopfform zerlegt

Die Trituration erfolgte im Duomat 2 der Firma Degussa.

Mischverhältnis und Mischzeit der einzelnen Amalgamsorten sind nach Angaben der Hersteller eingehalten worden und aus Tab. 1 zu entnehmen.

Den Probekörpern für die Biegefestigkeitsprüfung lag ein rechteckiger Querschnitt zugrunde. Die Maße der Stopfform betrugen 18 mm x 5mm x 5 mm, und die Stützweite der Versuchsvorrichtung war mit 15 mm festgelegt und konnte nicht variiert werden. Mit Hilfe eines Unterlegplättchens gelang die Herstellung von weiteren Probekörpern mit einer Dicke von 3 mm.

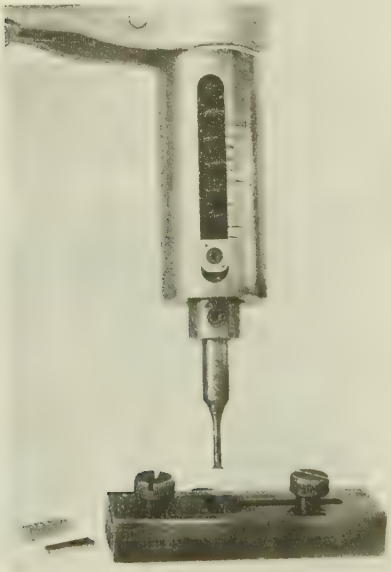

Abb. 4:
Stopfform und Federstopfer

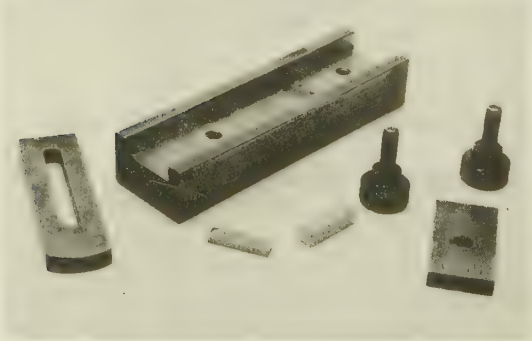

Abb. 5:
Stopfform zerlegt

Später stellte sich heraus, daß die Zugprüfmaschine Type 1384 der Firma "Zwick" mit der eingebauter 1000 kp Meßdose und einem kleinsten Meßbereich von 100 kp für die Festigkeitsprüfung dieser dünnen Probekörper ungeeignet war, und somit konnten nur diejenigen zur Biegefestigkeitsprüfung herangezogen werden, deren Verhältnis Probendicke/Stützweite = 1/3 betrug, d.h. 5 mm hoch waren.

Die Trituration erfolgte ebenfalls im Duomat 2 und mußte wegen der Größe der Probekörper portionsweise durchgeführt werden. Fünf Portionen waren für die Herstellung eines einzelnen Probekörpers der jeweiligen Amalgamsorte nötig mit Ausnahme von "True Dentalloy a cut". Hier wurde während des Stopfvorganges sehr viel Quecksilber abgepreßt und deshalb eine weitere Portion hinzugenommen, um einen dichten Amalgamprüfkörper zu erhalten. Die Portionen wurden hintereinander in die Stopfform eingebracht (zwiebelschalenförmiges Stopfen). Der Durchmesser des Federstopfers betrug 4,9 mm.

Aus der angewandten Stopfkraft F ergaben sich für den Stopfdruck P folgende Werte:

1. Standalloy F voramalgamiert, Standalloy voramalgamiert, Standalloy F nicht voramalgamiert, Standalloy nicht voramalgamiert, True Dentalloy a cut, True Dentalloy Zinc free

   $F = 12$ kp $P = 6{,}24 \frac{N}{mm^2}$

2. Luxalloy non gamma 2, A - 76

   $F = 10$ kp $P = 5{,}20 \frac{N}{mm^2}$

3. Shofu Amalgam Zinc λ , Shofu Amalgam non Zinc

   $F = 7$ kp $P = 3{,}69 \frac{N}{mm^2}$

Kugelamalgame bzw. Amalgame mit Kugelkomponente konnten oder mußten mit geringerem Druck gestopft werden als die konventionellen Amalgame, da sie sonst zur Seite auswichen (15).
Das überschüssige Amalgam wurde mit einem Metallstab walzend abgetragen und damit auch das überschüssige Quecksilber (Abb. 6).

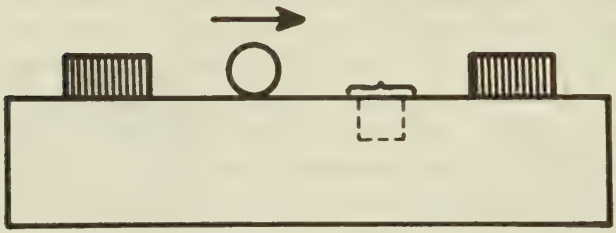

Abb. 6: Abtragen des überschüssigen Amalgames in der Stopfform

Bei den beiden Shofu-Kugelamalgamen wurde kein überschüssiges Quecksilber abgepreßt. Die Herstellung der Probekörper erfolgte nach der EAMES-Methode (trockenes Stopfen), während die anderen nach der JØRGENSEN-Methode (Naßtechnik) verarbeitet wurden (9, 24).

Die verschiedenen Probekörper lagen dann mindestens 7 Tage im Wärmeschrank bei $(37 \pm 1)°$ C. Die durchschnittliche Lagerzeit belief sich jedoch auf 8 bis 9 Tage. Es wurde angenommen, daß die Amalgame nach 168 Stunden der Verarbeitungszeit ausgehärtet waren. E.DOLDER und Mitarbeiter (6) vertraten 1961 die Meinung, daß sich Amalgame erst 240 Stunden nach dem Stopfen nicht mehr wesentlich verändern bezüglich ihrer Endhärte, wenn das Alloy 70 % Silber enthält.

4. STATISCHE HÄRTEPROFUNG NACH VICKERS

Unter der Härte eines Körpers versteht man den Widerstand, den dieser dem Eindringen eines anderen, härteren Prüfkörpers entgegensetzt. Dabei läßt man üblicherweise den Eindringkörper eine bestimmte Zeit mit einer bestimmten Kraft auf das Werkstück einwirken. Als Härtemaß wird entweder die Eindringtiefe des Eindringkörpers oder die Prüfkraft bezogen auf die Oberfläche des entstandenen Eindruckes angegeben.
Definiert man die Vickershärte als die auf die Eindrucksoberfläche A bezogene Prüfkraft F, so ergibt sich:

$$HV = \frac{F}{A} = \frac{1{,}854 \times 5\ kp}{d^2}$$

$$F = 5\ kp \qquad A = 4\ \frac{d}{2\sqrt{2}} \times \frac{d}{2\sqrt{2}\cos 22°} = \frac{d^2}{1{,}854}$$

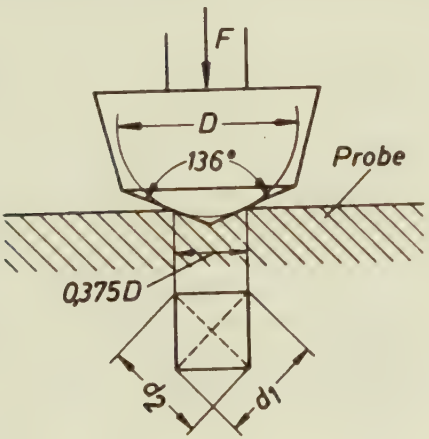

Abb. 7: Prinzip der Härteprüfung nach Vickers (Nach MACHERAUCH, E., 1970)

Für den Flächenöffnungswinkel der Vickerspyramide wird deshalb ein Wert von 136° gewählt, weil dann der Tangentenkegel eines im optimalen Arbeitsbereich liegenden Brinelleindruckes mit d = 0,375 D gerade den Winkel einschließt. Damit erhält man Vickers- und Brinellhärten, die bis zu Werten von etwa 350 kp/mm^2 übereinstimmen. Bei größeren Härten ergeben sich bei derselben Probe größere Vikerswerte als Brinellwerte, weil dann die geringen Brinelleindrücke Tangentenkegel mit größeren Öffnungswinkeln liefern (18).

4.1 Versuchsdurchführung

Vor der Versuchsdurchführung wurden die Stirnflächen der Probekörper mit Schmirgelpapier "6 F" trocken geschliffen. Die Messungen wurden dann an einem Härteprüfgerät mit optischer Mattscheibeneinrichtung durchgeführt. Der zu vermessende Probekörper wurde auf dem Prüftisch so lange in vertikaler Richtung verfahren, bis sich seine Oberfläche auf der Mattscheibe scharf abbildete. Durch Schwenken eines Auslösehebels wurde die vierseitige Diamantpyramide in Position geschwenkt und gleichzeitig der Belastungsmechanismus gestartet. Die Belastung betrug 5 kp, die Lastaufbringzeit 10 sec und die Lasteinwirkzeit 30 sec. Mit dem eingebauten Meßlineal wurden nach Ende des Belastungszykluses nun die 165-fach vergrößerten Eindruckdurchmesser d_1 und d_2 auf der Mattscheibe ermittelt, der Mittelwert d gebildet und der zugehörige HV-Wert einer Tabelle entnommen. Da drei Eindrücke auf einer Stirnfläche eines Probekörpers vorgenommen wurden, ergab der Mittelwert der drei HV-Werte die Vickershärte eines einzelnen Probekörpers. Der Mittelwert der 10 Probekörper einer Amalgamsorte wurde schließlich als deren Vickershärte definiert.

5. STATISCHE FESTIGKEITSPROFUNGEN

Mit der Belastung eines Prüfkörpers ist in jedem Fall eine Formänderung verbunden, und umgekehrt ist zu jeder Formänderung eine Kraft notwendig. Der Prüfkörper setzt also seiner Verformung einen gewissen Widerstand entgegen, der durch Kräfte überwunden werden muß.

Als Spannung wird jene Kraft bezeichnet, die auf die Flächeneinheit des noch nicht verformten Querschnittes entfällt. Beim Zug-, Druck- und Biegeversuch erzeugen die wirksamen Kräfte Normalspannungen σ , d.h. sie wirken senkrecht zur Schnittfläche, während beim Verdreh- und Scherversuch die wirksamen Kräfte Schubspannungen τ erzeugen, die in der Schnittfläche wirken. Jede Spannung kann nach dem Satz vom Parallelogramm der Kräfte durch eine Normal- und Schubspannung ersetzt werden, z.B. σ' in Abb. 8 durch σ_φ und τ_φ (2).

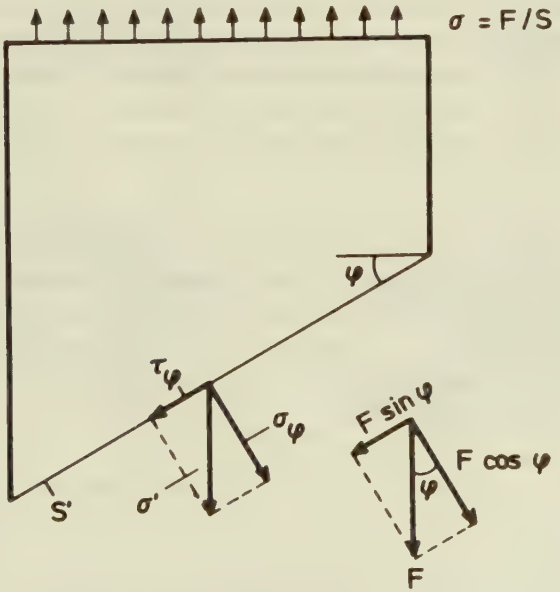

Abb. 8: Einachsiger Spannungszustand
(Nach BOUCHÉ, Ch., LEITNER, A., SASS, F., 1970)

In Abb. 8 ist: $\sigma = F/S$, $S/S' = \cos\varphi$ und

$$\sigma_\varphi = F \cos\varphi \,/S' = \sigma\, S/S' \cos\varphi = \sigma \cos^2\varphi ,$$

$$\tau = F \sin\varphi \,/S' = \sigma_\varphi \tan\varphi = \tfrac{1}{2}\sigma \sin 2\varphi$$

Neben Normalspannungen treten auch Schubspannungen auf. Ferner ist in Abb. 8

$$\sigma'^2 = \tau_\varphi^{\,2} + \sigma_\varphi^{\,2}, \text{ also } \sigma' = \sigma \cos\varphi \text{ parallel } \sigma .$$

Hierbei wird $\sigma' S' = \sigma S = F$ (2).

Die hier durchgeführten Festigkeitsprüfungen darf man als statische Festigkeitsprüfungen bezeichnen, bei denen neben Normalspannungen auch Schubspannungen aufgetreten sind. Die Prüfkörper wurden in einer geeigneten Vorrichtung der Wirkung einer langsam anwachsenden und stoßfreien Beanspruchung ausgesetzt, deren Größe mit Hilfe einer Kraftmessvorrichtung angegeben werden konnte. Die Belastung der Probekörper geschah derart langsam, daß Beschleunigungskräfte nicht auftraten oder vernachlässigt werden konnten.

Nach DIN 13904 und ADA-Specification Nr. 1 (1, 5) müssen die Druckplatten mit 0,5 mm/min gegeneinander gefahren werden. Diese Geschwindigkeit wurde bei der Druck- und Biegefestigkeitsprüfung sowie bei der Prüfung "tensile strength" eingehalten.

5.1 Druckfestigkeit

Der Druckversuch ist ein einachsiger Verformungsversuch. Die Berechnung der statischen Festigkeit beim Druckversuch, Druckfestigkeit genannt, erfolgt aus der Höchstkraft F_{max}, unter der der Bruch der Probe eintritt, und dem ursprünglichen Querschnitt A_o der Probe:

$$\sigma_{dB} = \frac{F_{max}}{A_o} \qquad A_o = \pi r^2 = 12{,}56 \text{ mm}^2 \qquad r = 2 \text{ mm}$$

Diese Spannung σ_{dB} entspricht jedoch nicht der "wahren" Spannung σ_w, die beim Bruch auftritt. Die "wahre" Spannung berechnet man nach der Formel

$$\sigma_w = \frac{F_{max}}{A_o} \quad (1-\varepsilon) \quad (26).$$

Hier wird also nicht der ursprüngliche Querschnitt bei der Berechnung zugrunde gelegt, sondern ein Querschnitt, der zwischen dem kleinsten und größten liegt.

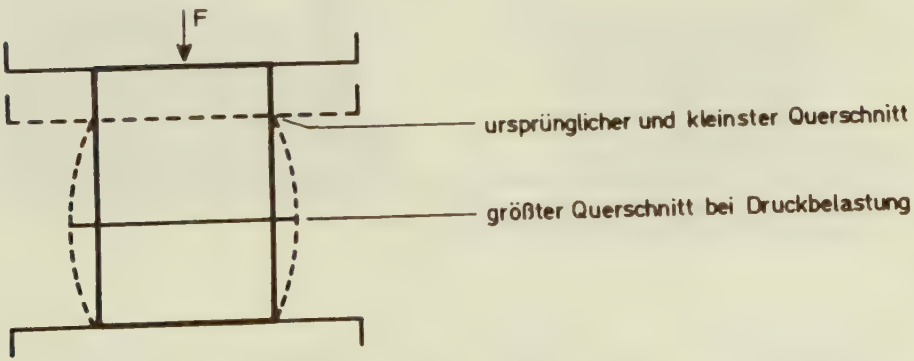

Abb. 9: Tonnenförmige Ausbauchung beim Druckversuch

Die "wahre" Spannung σ_w weicht aber von der berechneten Spannung σ_{dB} nur um wenige Prozent ab (26).

Bei den hier durchgeführten Druckversuchen lag die "wahre" Spannung etwa um 6,5 % niedriger als σ_{dB}.

Berechnung von ε :

$$\varepsilon = \frac{\Delta h}{h_o} = 0{,}06$$

Stauchung $\Delta h \approx$ 0,5 mm (s. Abb. 12)

Höhe der Prüfkörper h_o = 8 mm - 8,5 mm

Beim Druckversuch ist jedoch der Wert der Spannung stark von der Probengestalt abhängig. Ist der Durchmesser der Probe gleich seiner Höhe, so muß mit einer größeren Endflächenreibung gerechnet werden, und man erhält hohe Druckfestigkeitswerte. Mit zunehmender Vergrößerung der Probenhöhe bei gleichbleibendem Querschnitt und bei sonst gleicher Versuchsdurchführung sind die Werte der Druckfestigkeit dagegen herabgesetzt (26).

Aus diesem Grunde kann die Berechnung der Spannung beim Druckversuch durchaus nach der Formel

$$\sigma_{dB} = \frac{F_{max}}{A_o}$$ erfolgen.

Bei Feinmessungen wählt man bei der Werkstoffprüfung allgemein Höhen, die das zwei- bis dreifache der Durchmesser betragen.

Bei den nach DIN 13904 hergestellten Amalgamprüfkörper beträgt das Verhältnis $\frac{h_o}{d} \approx 2$.

5.1.1 Versuchsdurchführung

Bevor die Prüfkörper getestet wurden, wurden die Stirnflächen nach DIN 13904 mit Schmirgelpapier 6 F so plangeschliffen, daß sie möglichst senkrecht zur Probeachse standen. Dann wurden die Probekörper beim Einbringen zwischen die Druckplatten sorgfältig nach der Maschinenachse ausgerichtet. Die obere der beiden Druckplatten der Zugprüfmaschine Bauart Zwick war kugelig gelagert, damit auf jeden Fall eine reine Druckkraft ohne Biegemoment in der Probe entstand.

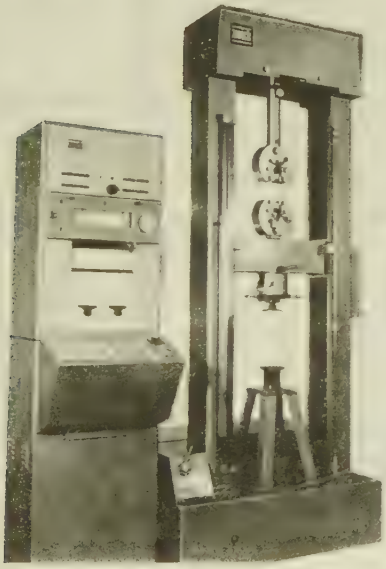

Abb. 10:
Elektronische Zugprüfmaschine Fa. Zwick

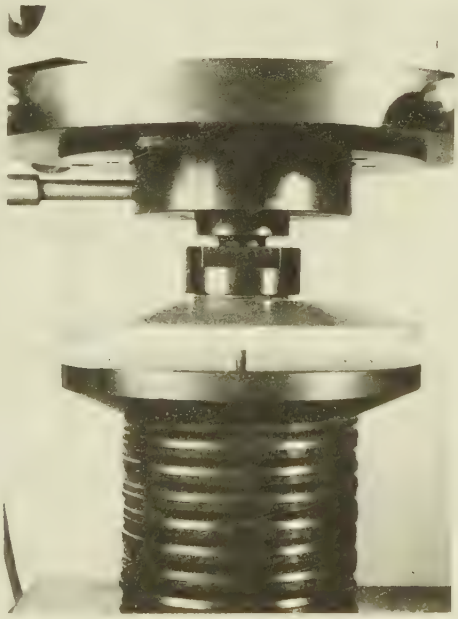

Abb. 11:
Druckplatten mit Probekörper

5.1.2 Spannungs- Stauchungskurven der 10 Amalgamsorten

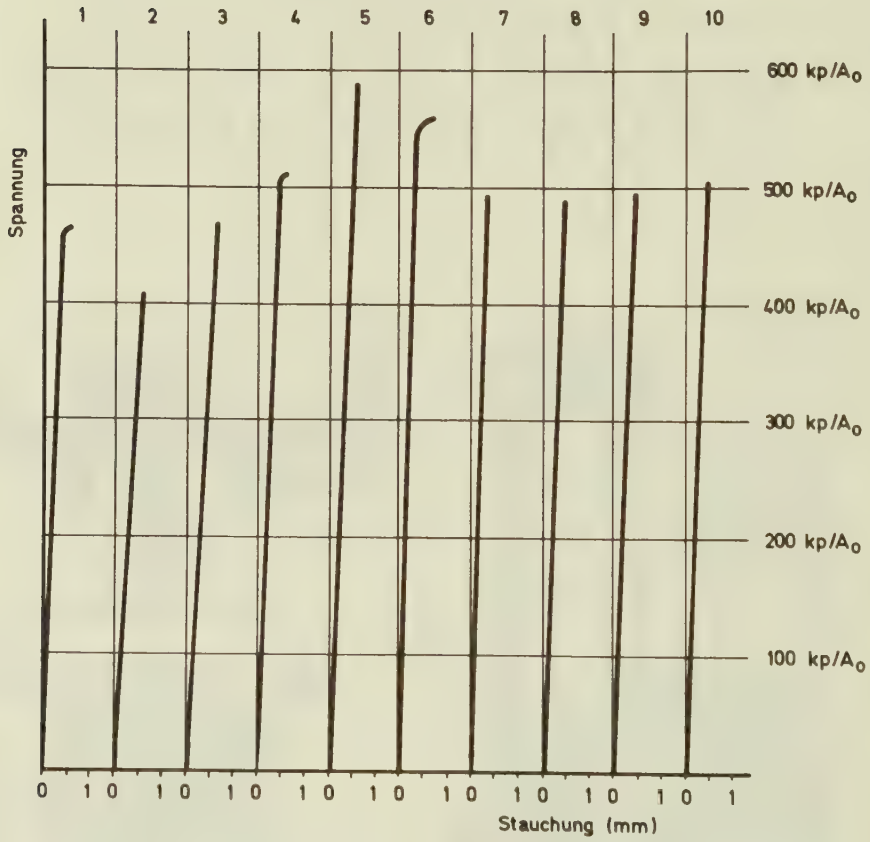

Abb. 12: Spannungs- Stauchungskurven

Die Spannungs- Stauchungskurven in Abb. 12 machen deutlich, daß Amalgam ein sehr spröder Werkstoff ist. Zum Vergleich werden in Abb. 13 die Spannungs- Stauchungskurven von Grauguß, einem spröden Werkstoff, weichem Flußstahl und Zink, beides gut verformbare Metalle, dargestellt (26).

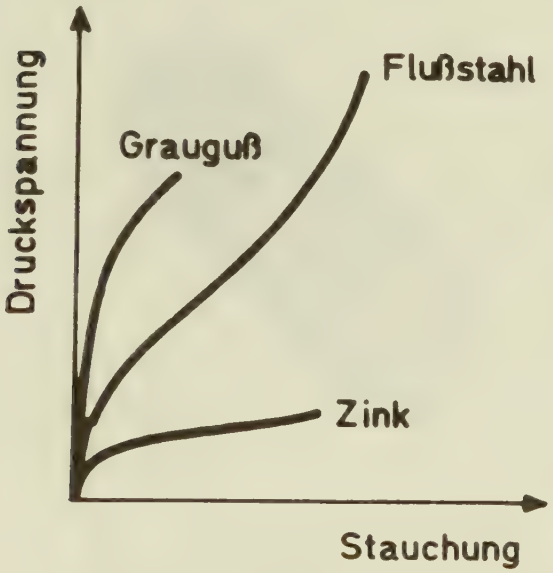

Abb. 13: Spannungs- Stauchungskurven
(Grauguß, Flußstahl, Zink, nach SIEBEL, E., 1955)

5.2 Tensile strength

Nach der ADA-Specification Nr. 1 werden die zylindrischen Prüfkörper längs zwischen die Druckplatten gelegt (Abb. 14).

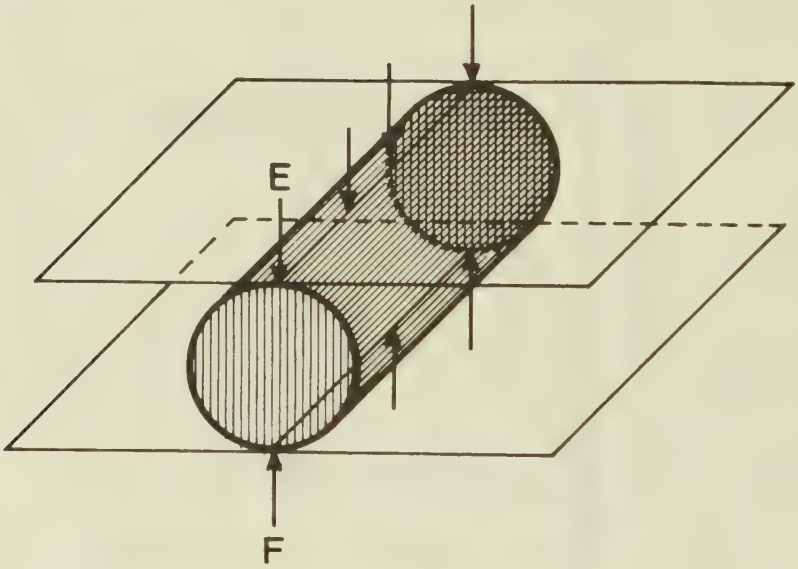

Abb. 14: Verformungsversuch "Tensile strength"

Die Spannung St wird nach folgender Formel berechnet:

$$St = \frac{2\,F_{max}}{\pi d l} \qquad (1)$$

St = Tensile stress

F_{max} = Höchstkraft, unter der der Bruch der Probe eintritt

d = Durchmesser der Probekörper

l = Länge der Probekörper

Diese Formel muß in Anlehnung der Hertzschen Gleichungen entwickelt worden sein.

HERTZ (3) entwickelte seine Gleichungen unter folgenden Voraussetzungen:

a) homogene, isotrope, vollkommen elastische Körper;
b) Gültigkeit des Hookeschen Gesetzes;
c) die Abplattungen sind klein gegenüber den Körperabmessungen;
d) in der Druckfläche treten nur Normalspannungen (Druck) auf, keine Schubspannungen.

Nach HERTZ gilt: Zylinder und Ebene

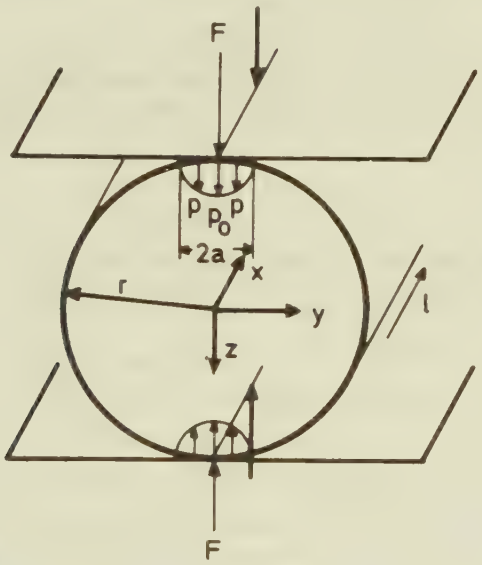

Abb. 15: HERTZ'sche Pressung

$$a = \sqrt{\frac{8\,(1-\mu^2)\,Fr}{\pi E T}} = 1{,}52\,\sqrt{\frac{Fr}{ET}}$$

$$p = p_o\,\frac{\sqrt{a^2 - \varrho^2}}{a}$$

Die Abplattung kann nach den Hertzschen Gleichungen nicht berechnet werden.

Die Druckspannung verteilt sich über die Breite halbkreisförmig, wenn die größte Druckspannung p_o gleich a gezeichnet wird. Es ist

$$p_o = \sqrt{\frac{FE}{2\pi r l\,(1-\mu^2)}} = 0{,}418 \quad \sqrt{\frac{FE}{rl}} = \frac{2\,F_{max}}{\pi a l}$$

a	Halbe Breite der rechteckigen Druckfläche
F	Druckkraft
μ	= 0,3 Querzahl (Poissonzahl)
r	Krümmungsradius des Zylinders
E	Elastizitätsmodul
l	Länge des Zylinders
p	Druck auf der Berührungsfläche im Abstand φ
$p_o = p_{max}$	Druck in der Mitte der Berührungsfläche
φ	Ordinate in Breitenrichtung der Berührungsfläche

Ferner ist in der Mitte $\sigma_y = \sigma_z$, $\sigma_x = 2\mu\sigma_z = 0{,}6p_o$. An den Zylinderenden wird $\sigma_x = 0$. Der Spannungsverlauf längs der z-Achse zeigt, daß max $\tau = 0{,}30p_o$ für $z = 0{,}78\ a$ auftritt. Während in der Mitte $\tau_{max} = \frac{1}{2}(p_o - 0{,}6p_o) = 0{,}20p_o$ wird, ist an den Zylinderenden $\tau_{max} = 0{,}50p_o$ (2).

Es liegt also beim Verformungsversuch "tensile strength" ein dreiachsiger Spannungszustand vor im Gegensatz zum Druck-, Zug- und Biegeversuch, wo wir es mit einachsigen Verformungsversuchen und einachsigen Spannungszuständen zu tun haben. Deshalb sollte der Begriff "tensile strength" nicht ins Deutsche übersetzt werden, weil er hier wörtlich "Zugfestigkeit" bedeutet.

Für die Ursachen des Bruches einer Probe, die mehrachsigen Spannungszuständen unterworfen ist, sind verschiedene Hypothesen aufgestellt worden.

Hierbei führt man die Vergleichsspannung oder reduzierte Spannung σ_{red} ein, durch die der im allgemeinen mehrachsige Spannungszustand auf einen einachsigen zurückgeführt wird (s. Hypothesen: MOHR, COULOMB, MARIOTTE, GRASHOF, BELTRAMI, HUBER usw.) (2).

Mehrachsige Spannungszustände sind, was ihre Berechnung anbetrifft, wesentlich komplizierter als einachsige, und viele der Hypothesen konnten durch den Versuch nicht immer bestätigt werden (2).

Die HERTZ'schen Voraussetzungen treffen aber nicht alle auf den spröden Amalgamprüfkörper zu.
(Voraussetzungen a) und b)). Ob nun die Berechnung der Spannung nach der Formel

$$St = \frac{2\,F_{max}}{\pi d l}$$

aufgrund der Substitution von a durch d für den Amalgamprüfkörper Gültigkeit besitzt, kann hier nicht abgeklärt werden.

Mit Sicherheit ist aber der Bruch der Proben nicht aufgrund der Schubspannung τ_{max} eingetreten, da Amalgam eben ein spröder Werkstoff ist und sich bei Beanspruchung nicht plastisch verformt. Der Bruch wird also durch die Normalspannungen σ_x, σ_y und σ_z verursacht (s. dazu Biegeversuch, Abschnitt 5.3).

5.2.1 Versuchsdurchführung

Die Probekörper lagen längs zwischen den Druckplatten der Zugprüfmaschine und wurden oben und unten von einer Aluminiumfolie der Stärke 0,08 mm bedeckt. Nach Vorschrift der ADA-Specification Nr. 1 (1) hätten je 2 Folien der Stärke 0,038 mm oben und unten verwendet werden müssen. Leider konnten diese nicht erworben werden.

Nach der Versuchsdurchführung wurde größtenteils Bruchbild I registriert mit Ausnahme von einigen Abweichungen (Bruchbild II).

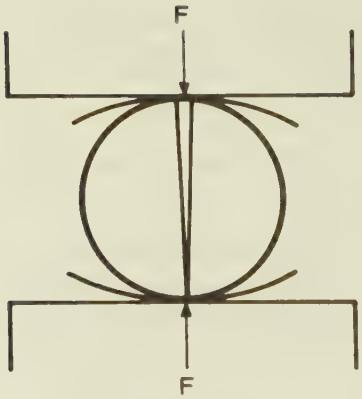

Abb. 16:
Bruchbild I
"tensile strength"

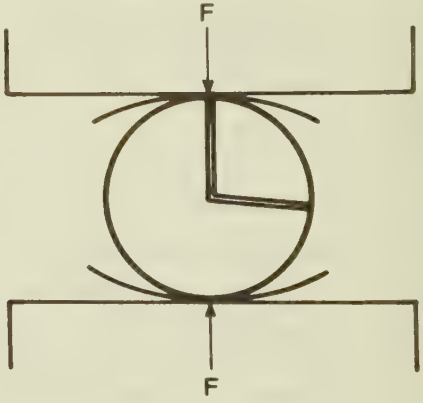

Abb. 17:
Bruchbild II
"tensile strength"

5.2.2 Spannungs- Pressungslinien der 10 Amalgamsorten

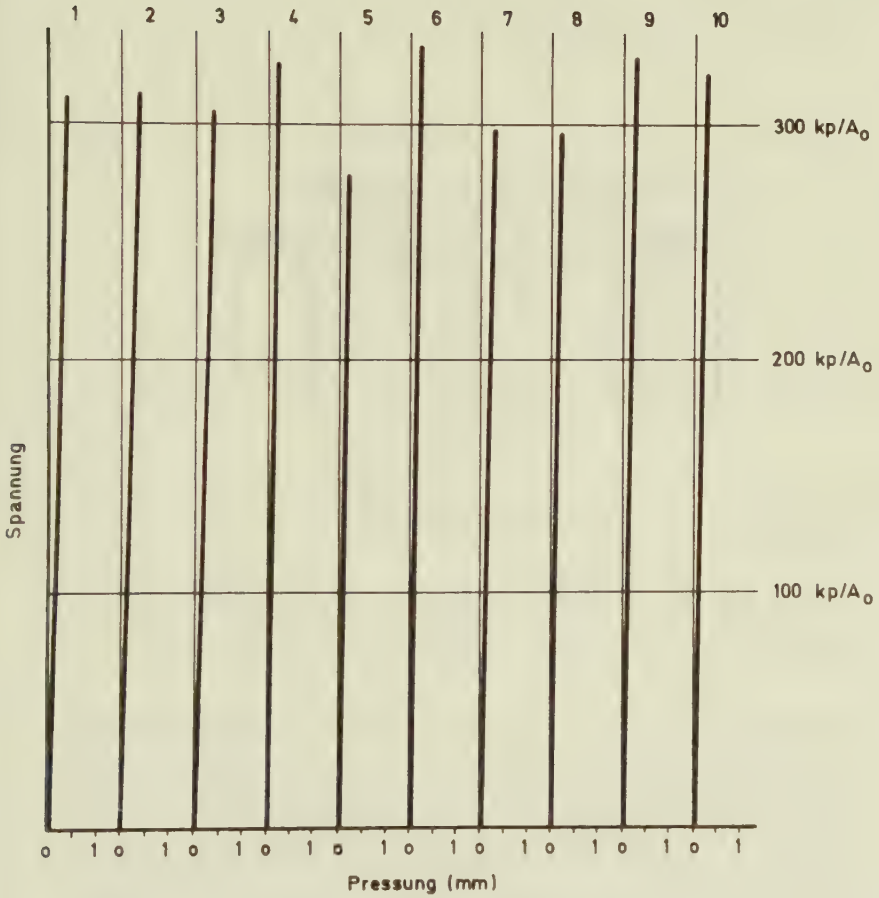

Abb. 18: Spannungs- Pressungslinien

5.3 Biegefestigkeit

Der Biegeversuch ist wie der Druck- und Zugversuch ein einachsiger Verformungsversuch, bei dem jedoch keine Einzelkräfte, sondern Kräftepaare wirksam sind. Bei Dreipunktbelastung (Abb. 19) wird der untere Querschnittsteil gedehnt und der obere gestaucht (7, 26).

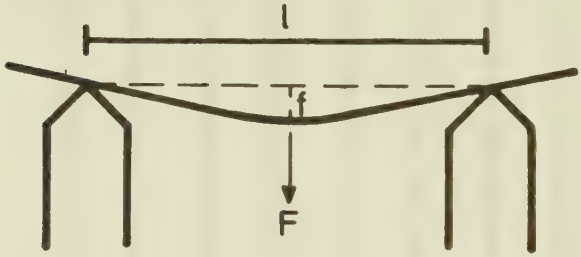

Abb. 19: Prinzip der Dreipunktbelastung

Die von Zug- und Druckspannungen beanspruchten Querschnittsteile werden durch eine Probenschicht getrennt, in der keine Kräfte auftreten, und die neutrale Faser genannt wird.

Der Querschnitt des Prüfkörpers ist also den verschiedensten Normalspannungen unterworfen. Der Biegeversuch ergibt somit keine gleichmäßige Beanspruchung, sondern wir haben in jedem Querschnitt Zug- und Druckspannungen nebeneinander, jede für sich von Null bis zu einem Höchstwert ansteigend. Nebenbei treten noch Schubspannungen auf, die bei großen Stützweiten und kleinen Probendicken vernachlässigt werden können (26).

Aus dem Integral für das Biegemoment

$$M_b = \int_{e_d}^{e_z} e\,\sigma \; df$$

ergeben sich die höchsten Spannungen zu

$$\sigma_z = \frac{M_b \cdot e_z}{I} \qquad \text{und} \quad \sigma_d = \frac{M_b \cdot e_d}{I}$$

M_b	= Biegemoment
σ	= Spannung an der Fläche df im Abstand e von der neutralen Faser
σ_z	= gesuchte höchste Randspannung auf der Zugseite
σ_d	= gesuchte höchste Randspannung auf der Druckseite
e_z bzw. e_d	= Abstände der äußersten Faser von der neutralen Faserschicht
I	= Trägheitsmoment
$W = \frac{I}{e}$	= Widerstandsmoment

Daraus folgt:

$$\sigma_z = \frac{M_b}{W_z}$$

$$\sigma_d = \frac{M_b}{W_d}$$

Bei symmetrischen Querschnitten, z.B. dem Kreis, dem regelmäßigen Vier- oder Sechseck, sind die Entfernungen des Schwerpunktes von der Randfaser e_z und e_d gleich. Folglich werden die größten am Rande auftretenden Zugspannungen gleich den größten Druckspannungen und $\sigma_z = \sigma_d = \sigma_b$ (26).

$$\sigma_b = \frac{M_b}{W_b}$$

Ist der Querschnitt der Prüfkörper laut Abb. 20, dann gilt für das Trägheitsmoment: $I = bh^3/12$,

das Widerstandsmoment: $W_b = bh^3/12 : h/2 = bh^2/6$ (2).

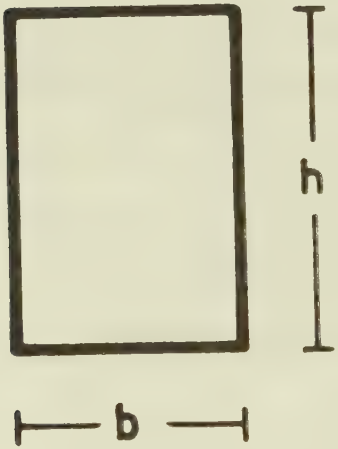

Abb. 20: Querschnitt der Prüfkörper

Bei Dreipunktbelastung eines Probekörpers, bei dem der gefährdete Querschnitt in der Mitte liegt (Abb. 19), gilt für das Biegemoment $M_{b\ max}$:

$$M_{b\ max} = F_{max} \cdot 1/4 \quad (2)$$

Daraus folgt:

$$\sigma_{bB} = \frac{F_{max} \cdot 1/4}{bh^2/6} = \frac{3}{2} \frac{F_{max} \cdot 1}{bh^2}$$

F_{max} = Höchstkraft, unter der der Bruch der Probe eintritt

σ_{bB} = Biegespannung bei Bruch.

Diese Formel für die Biegefestigkeit gilt genau genommen nur dann, wenn folgende Bedingungen erfüllt sind:

"1. Die Querschnitte bleiben beim Biegen eben, d.h. die Dehnungen sind proportional zum Abstand von der neutralen Faserschicht.
2. Das Hookesche Gesetz gilt, d.h. auch die Spannungen sind proportional zum Abstand von der neutralen Faserschicht.
3. Der Werkstoff verhält sich bei Zug- und Druckbeanspruchung gleich." (7)

Amalgam erfüllt jedoch wie Grauguß nur die erste Bedingung, d.h. das Hookesche Gesetz hat keine Gültigkeit und $\sigma_z \neq \sigma_d$.

Die Zugspannung liegt wertmäßig weit unter der Druckspannung. Das ist bei spröden Materialien allgemein üblich. Beim Zugversuch sind diese besonders empfindlich gegen zusätzliche Biegespannungen, da sie nicht fähig sind, diese durch plastische Verformung auszugleichen. Kein Zugversuch ist im Laboratorium so exakt, daß zusätzliche Biegespannungen vermieden werden können. Ist ein Riß in der Probe entstanden, so breitet er sich sehr schnell über deren gesamten Querschnitt aus, und es kommt zum frühzeitigen Bruch.

Beim Zugversuch von spröden Materialien erhält man also zu niedrige Werte, die der wahren Festigkeit des Werkstoffes nicht entsprechen (26). Deshalb ist ein reiner Z u g v e r s u c h bei der Festigkeitsprüfung von Amalgamen abzulehnen.

Trotz Nichterfüllung der Bedingungen 2 und 3, findet der Biegeversuch bei spröden Materialien allgemein Anwendung. Die Festigkeitswerte liegen über denen der Zugspannung, obwohl der Bruch der Probe von der Zugseite ausgeht. Das läßt sich mit der Verschiebung der neutralen Faser erklären (7).

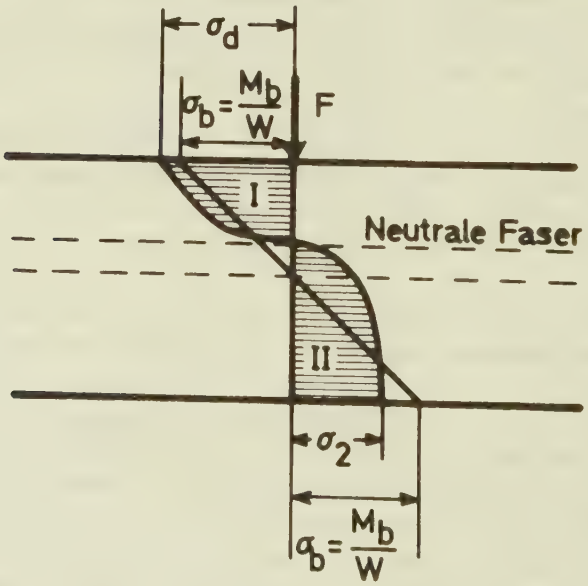

Abb. 21: Verschieben der neutralen Faser
(Nach DOMKE, W., 1975)

Die tatsächliche Spannung auf der Zugseite ist zwar niedriger als die auf der Druckseite, dafür sind aber die Druckspannungswerte bei spröden Werkstoffen mindestens 3- bis 4mal so hoch (7).

Für die Versuchsdurchführung und Berechnung der Spannung ist eine weitere Kennzahl außerordentlich wichtig, nämlich das Verhältnis von Probendicke h zu Stützweite l.

Bei Dreipunktbelastung (Abb. 19) gilt:

$$f_b = \frac{1}{4} \frac{Fl^3}{Ebh^3} \quad \text{und} \quad f_q = 0{,}3 \frac{Fl}{Gbh}$$

Es ist $\frac{E}{G} = 2\,(1+\mu) = 2{,}6$ für $\mu = 0{,}3$

f_b Senkung des Angriffspunktes der Last infolge der Biegemomente

f_q Senkung des Angriffspunktes der Last infolge der Querkraft

E Elastizitätsmodul

G Gleitmodul

μ = 0,3 Poissonzahl

$$f_{ges} = f_b + f_q = f_b \left[1+3{,}12(h/l)^2\right] = f_q \left[1+0{,}321(l/h)^2\right],$$

d.h. für $h/l = \sqrt{0{,}321} = 0{,}566$ ist $f_b = f_q$, und für $h/l < 0{,}566$ überwiegt f_b, für $h/l > 0{,}566$ überwiegt f_q.

Für $h/l < 1/16$ ist der Fehler durch Vernachlässigung der Schubkraft kleiner als 1,2 %,
für $h/l > 6$ ist der Fehler durch Vernachlässigung der Biegung kleiner als 0,9 % (2).

Deshalb wird beim Biegeversuch im allgemeinen ein Verhältnis $h/l \approx 1/20$ gefordert.

Da die Amalgamprüfkörper 5 mm hoch waren und die Stützweite 15 mm betrug, lag ein Verhältnis h/l = 0,333 vor. Das bedeutet:

$$0{,}333 \approx 0{,}566$$

Schub- und Biegespannungen treten also in gleichem Maße auf. Dennoch wurde die Formel

$$\sigma_{bB} = \frac{3}{2} \quad \frac{F_{max} \cdot l}{bh^2}$$

bei der Berechnung der Biegespannung verwendet, da bei spröden Materialien immer der Bruch aufgrund der Normalspannung eintritt und nicht der Schubspannung, da sich ja spröde Werkstoffe nicht plastisch verformen und bereits bei sehr kleinen Biegewinkeln brechen.

5.3.1 Versuchsdurchführung

Vor der Versuchsdurchführung wurde die Oberfläche der Probekörper ebenfalls mit Schmirgelpapier 6 F trocken geschliffen. Die Probekörper wurden dann entsprechend ihrer Stopfrichtung in die Versuchsvorrichtung eingebracht.

Abb. 22: Versuchsvorrichtung beim Biegeversuch mit Probekörper (Dreipunktbelastung)

Abb. 23: Versuchsvorrichtung ohne Probekörper

Bei der Durchbiegung von Proben mit rechteckigem Querschnitt können sich folgende Bruchbilder ergeben:

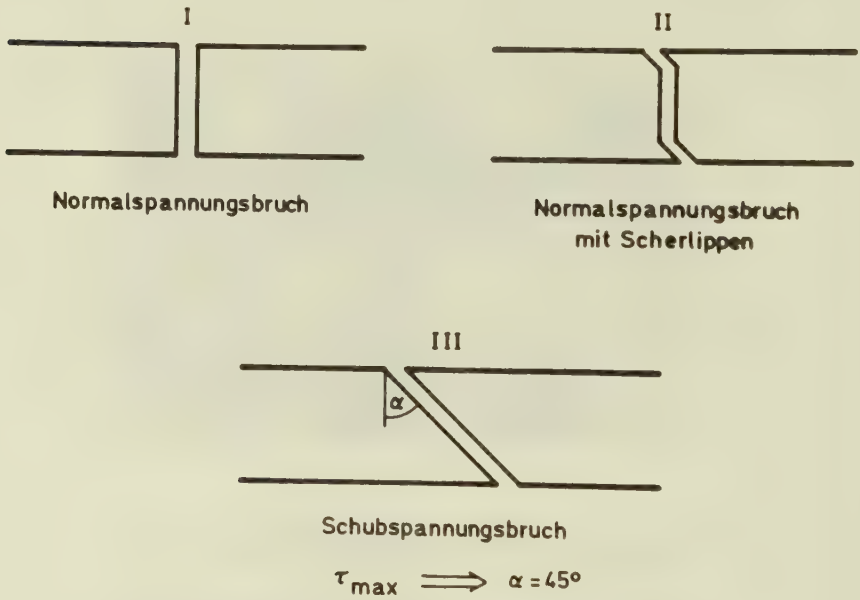

Abb. 24: Bruchbilder
(Nach MACHERAUCH, E., 1970)

Nach Versuchsdurchführung wurden beispielsweise folgende Bruchbilder registriert.

Abb. 25: Bruchbild (Biegeversuch) 20-fache Vergrößerung

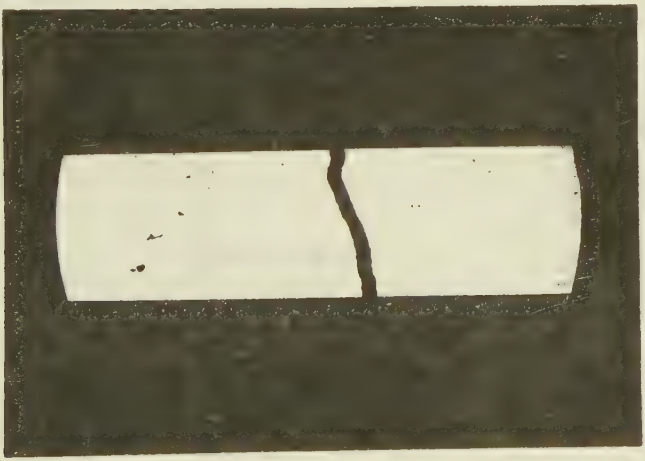

Abb. 26: Bruchbild (Biegeversuch) 20-fache Vergrößerung

Es handelt sich bei Abb. 25 und 26 um einen Normalspannungsbruch. Entscheidend ist, daß der Bruch von der Zugseite her zunächst senkrecht verläuft. Die dann schräge Rißausbreitung kann struktuerell bedingt oder auch durch Poren verursacht worden sein.

Sicherlich sind auch Schubspannungen in hohem Maße beteiligt gewesen, was ja durch das Verhältnis h/l = 0,333 angenommen werden muß; diese haben aber den Bruch nicht ausgelöst (s. dazu Abb. 40).

5.3.2 Spannungs- Durchbiegungsschaubild

Die Spannungs- Durchbiegungsschaubilder der 10 Amalgamsorten haben hinsichtlich ihrer Durchbiegung nahezu keine Unterschiede erkennen lassen.

Aus Abb. 27 geht hervor, daß die Probekörper schon bei ganz geringen Biegewinkeln gebrochen sind, was bei spröden Materialien in der Regel der Fall ist (26).

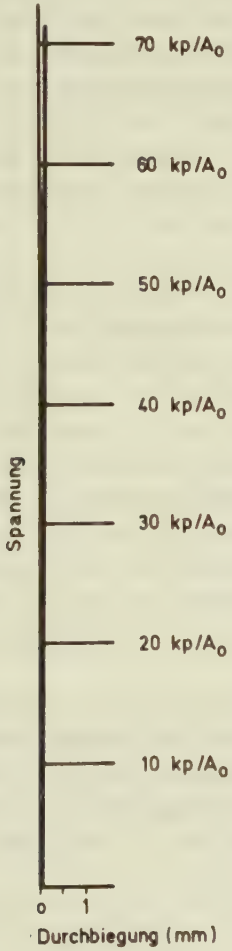

Abb. 27: Spannungs- Durchbiegungsschaubild eines Probekörpers

6. STATISTISCHE AUSWERTUNGEN

Die Deutsche Norm DIN 13904 und die ADA-Specification Nr. 1 (1, 5) schreiben vor, daß die Festigkeitswerte der Amalgamsorten durch die Bildung des Mittelwertes von 5 Messungen bestimmt werden. Dabei dürfen bis zu 40 % Ausreißer auftreten, d.h. der Mittelwert wird dann aus nur 3 Messungen gebildet.

Man muß sich nun die Frage stellen, ob bei so geringen Stichprobenumfängen überhaupt Aussagen bezüglich der Festigkeit eines Amalgames gemacht werden können und ob sich das eine vom anderen signifikant unterscheidet. Die Teststärke oder Testschärfe (s. Abschnitt 6.4) ist jedenfalls bei kleinen Stichprobenumfängen herabgesetzt, d.h. das vorliegende Ergebnis muß sehr vorsichtig interpretiert werden.

Im weiteren Verlauf dieses Abschnittes wird dem Leser vermittelt, daß der sonst so beliebte t-Test keine Anwendung finden kann. Erstens werden mehrere Mittelwerte miteinander verglichen und dadurch die Testschärfe beim t-Test herabgesetzt (s. Abschnitt 6.7). Zweitens ist der t-Test ein klassischer Test und hat die Voraussetzung, daß die Homogenität der Varianzen gewahrt ist (s. Abschnitt 6.6), was bei der Härteprüfung und beim Druckversuch nicht der Fall ist. Neben den klassischen Tests mußten deshalb auch parameterfreie durchgeführt werden (s. Abschnitte 6.4, 6.7 und 6.8).

Die Prüfung der Homogenität der Varianzen erfolgt mit dem Bartlett-Test. Dieser ist jedoch nur durchzuführen, wenn mindestens 5 Messungen je Amalgamsorte gemacht und keine Ausreißer eliminiert werden (s.S. 48). Deshalb erschien es sinnvoll, mindestens 10 Messungen je Amalgamsorte vorzunehmen.

Man darf sich bei statistischen Auswertungen nicht nur auf die Ermittlungen von Mittelwerten und Standardabweichungen beschränken. Es kann durchaus der Fall sein, daß sich ein Amalgam bei der Härte- oder Festigkeitsprüfung, das bezüglich der Größe seines Mittelwertes an 6. Stelle steht, sich von einem anderen Amalgam, das bezüglich der Größe seines Mittelwertes an 10. Stelle steht, nicht signifikant unterscheidet. Dieser Fall liegt beim Scheffé-Test bezüglich der Biegefestigkeit vor (Tab. 13 u. 17). A - 76 nimmt bezüglich der Größe seines Mittelwertes Rang 6 ein und Luxalloy non gamma 2 Rang 10. Beide Amalgame liegen aber gleich, was ihre Biegefestigkeit betrifft.

Solche Aussagen können unter Anwendung des t-Tests nicht gemacht werden.

Das Durchprobieren verschiedener statistischer Tests ist jedoch verboten. Man prüft lediglich, welche Voraussetzungen sind gegeben und bedient sich dann des Tests, der diese Voraussetzungen erfüllt.

Zusammenfassend soll noch einmal hervorgehoben werden, daß statistische Auswertungen der Bequemlichkeit wegen nicht ohne weiteres auf ein Minimum an Seitenzahl begrenzt werden dürfen, da sonst falsche Schlüsse aus den unvollständig gewonnenen Ergebnissen gezogen werden.

6.1 Ermittlung der Ausreißer

Nachdem alle Prüfkörper der 10 Amalgamsorten auf ihre Härte, Druck- und Biegefestigkeit sowie "tensile strength" getestet wurden, wurden die Mittelwerte errechnet und dann die Ausreißer nach DIN 13904 bzw. ADA-Specification Nr. 1 ermittelt (1, 5).

Probekörper, deren Wert mehr als 15 % unter dem Mittelwert liegt, scheiden aus, und der Mittelwert wird aus den Messungen an den verbleibenden Probekörpern berechnet.

Scheiden mehr als 4 von 10 Probekörper aus der Serie aus, so ist die Prüfung zu wiederholen (s.Tab. 2), (5).

6.2 Mittelwerte $\bar{x}$

Berechnung: $\bar{x} = \frac{1}{n} (x_1 + x_2 \ldots . x_n)$ (13)
(s.Tab. 3).

6.3 Berechnung der Standardabweichung

Varianz: $s^2 = \frac{1}{n-1} \sum_{i=1}^{n} (x_i - \bar{x})^2$

Standardabweichung: Die nicht negative Quadratwurzel der Varianz heißt die Standardabweichung und wird mit s bezeichnet. s besitzt dieselbe Dimension wie die x_i (s.Tab. 3), (13).

Amalgamsorte	Vickersh.	Druckf.	Biegef.	tens.str.
Standalloy F voramalgamiert	-	-	-	2
Standalloy voramalgamiert	-	-	-	4
Standalloy F nicht voramalg.	-	-	1	-
Standalloy nicht voramalg.	-	-	-	4
Luxalloy non gamma 2	-	1	1	1
A-76 non gamma 2	-	-	1	-
Shofu Spherical Zinc λ	-	-	-	-
Shofu Spherical non Zinc 8 M	-	-	-	2
True Dentalloy A cut	-	-	1	1
True Dentalloy Zinc free	-	-	1	-
insgesamt	-	1	5	14

Tab. 2: Ausreißer

$\bar{x}$, s und V_r

Amalgamsorte	Vickersh. (HV)	Druckf. (N/mm^2)	Biegef. (N/mm^2)	tens.str. (N/mm^2)
Standalloy F voramalgamiert	94,72	355,98	106,17	57,69
	2,97 -	12,90 -	5,25 -	7,61 -
	3,14 %	3,62 %	4,94 %	13,19 %
Standalloy voramalgamiert	103,98	353,09	113,82	50,14
	3,61 -	14,44 -	8,55 -	8,33 -
	3,48 %	4,09 %	7,51 %	16,61 %
Standalloy F nicht voramalg.	97,79	368,16	144,21	55,19
	2,69 -	6,40 -	5,98 -	5,80 -
	2,75 %	1,74 %	4,15 %	10,51 %
Standalloy nicht voramalg.	103,78	398,08	107,87	64,89
	1,82 -	10,54 -	8,73 -	3,79 -
	1,75 %	2,65 %	8,09 %	5,84 %
Luxalloy non gamma 2	129,87	435,11	96,79	51,16
	3,29 -	24,03 -	9,75 -	4,48 -
	2,53 %	5,52 %	10,07 %	8,76 %
A - 76 non gamma 2	114,01	417,28	110,20	59,55
	5,53 -	21,17 -	8,23 -	5,75 -
	4,85 %	5,07 %	7,47 %	9,66 %
Shofu Spherical Zinc λ	106,79	372,77	130,72	56,26
	8,53 -	21,58 -	11,16 -	6,18 -
	7,99 %	5,79 %	8,54 %	10,98 %
Shofu Spherical non Zinc 8 M	109,98	362,31	134,49	57,30
	5,65 -	16,70 -	10,70 -	7,67 -
	5,14 %	4,61 %	7,96 %	13,54 %
True Dentalloy A cut	113,11	386,21	119,01	58,14
	3,13 -	7,07 -	6,45 -	5,71 -
	2,77 %	1,83 %	5,42 %	9,82 %
True Dentalloy Zinc free	103,59	398,24	106,82	56,81
	3,22 -	6,80 -	8,70 -	6,53 -
	3,11 %	1,71 %	8,14 %	11,49 %
$\bar{x}$	107,76	384,72	117,01	56,71
s in %	3,75 %	3,66 %	7,23 %	11,04 %

Tab. 3: Mittelwerte $\bar{x}$, Standardabweichungen s und relative Variationskoeffizienten V_r

6.4 Der statistische Test

Die bis jetzt gewonnenen Werte und Mittelwerte sollen mit Hilfe statistischer Tests analysiert und verglichen werden. Man unterscheidet dabei zwei Arten von statistischen Tests, nämlich den parametrischen oder klassischen Test und den parameterfreien oder verteilungsfreien Test. Der parametrische Test dient zur Nachprüfung von Hypothesen über einen Parameter (z.B. der Nullhypothese, daß zwei Mittelwerte $\bar{x}_1$ und $\bar{x}_2$ gleich sind) und setzt im allgemeinen voraus, daß 1. die Grundgesamtheiten zumindest angenähert normalverteilt und 2. die Varianzen gleich sind. Der parameterfreie Test prüft, ob eine beobachtete Verteilung mit einer hypothetischen verträglich ist. Ober die Form der Verteilung wird keinerlei Voraussetzung gemacht. Es muß lediglich plausibel erscheinen, daß die zu vergleichenden Stichproben derselben Grundgesamtheit entstammen (25).

Die Eigenart des Tests bezeichnet man als Teststärke oder Testschärfe. Diese ist um so größer:

" 1. Je höher der vom Test verwendete Informationsgehalt der Ausgangsdaten ist - nimmt also in der Reihe: Häufigkeiten, Rangplätze und Meßwerte zu.
2. Je mehr Voraussetzungen über die Verteilung der Werte gemacht werden: Ein Test, der Normalverteilung und Varianzhomogenität erfordert (z.B. der parametrische Test), ist im allgemeinen wesentlich stärker als einer, der keinerlei Voraussetzungen macht" (25).

Der verteilungsfreie Test ist also gegenüber dem parametrischen Test durch eine geringere Teststärke charakterisiert. Analysiert man dennoch normalverteilte oder Meßwerte mit homogenen Varianzen, so nimmt man bei seiner Anwendung einen höheren Fehler 2. Art in Kauf. Unter dem Fehler 2. Art versteht man das unberechtigte Beibehalten der Nullhypothese, unter dem Fehler 1. Art die unberechtigte Ablehnung der Nullhypothese.

Liegen andererseits kleine Stichproben vor ($n < 15$), dann können - was aber nicht der Fall sein muß - verteilungsfreie Tests wirksamer sein als die sonst optimalen klassischen Tests (25).

Ist ferner der Stichprobenumfang klein, dann sollte das Signifikanzniveau nicht zu klein sein, da sonst die Teststärke an Größe verliert. Die Irrtumswahrscheinlichkeit α ist jedenfalls $\leqq$ 5 % zu wählen (25).

6.5 Test auf Normalverteilung

Der Kolmogoroff-Smirnow-Test

Unter Verwendung des Kolmogoroff-Smirnow-Tests (13) wird die Hypothese geprüft, ob die jeweiligen Meßwerte einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen.

Nullhypothese H_0: Die jeweiligen Meßwerte entstammen einer normalverteilten Grundgesamtheit.

Gegenhypothese H: Die jeweiligen Meßwerte entstammen nicht einer normalverteilten Grundgesamtheit.

Vorgehen:

1. Berechnung der Werte der Verteilungsfunktion $\tilde{F}(x)$ der Stichprobe $x_1 \ldots\ldots x_n$
2. Bestimmung der Maximalabweichung $a = \max |\tilde{F}(x) - F(x)|$ zwischen $\tilde{F}(x)$ und $F(x)$.
3. Wahl der Signifikanzzahl $\alpha = 5\ \%$
4. Bestimmung der Lösung c der Gleichung

$$P(a \leqq c) = 1-\alpha$$

c wird der dem Stichprobenumfang n entsprechenden Zeile einer Tafel entnommen. Ist $a \leqq c$, so wird die Nullhypothese angenommen. Ist $a > c$, so wird sie verworfen.

Amalgamsorte	Vickersh.	Druckf.	Biegef.	tens.str.
Standalloy F	0,249	0,183	0,138	0,259
voramalgamiert	0,409	0,409	0,409	0,458
Standalloy	0,100	0,066	0,168	0,144
voramalgamiert	0,409	0,409	0,409	0,519
Standalloy F	0,073	0,116	0,212	0,145
nicht voramalg.	0,409	0,430	0,409	0,409
Standalloy	0,127	0,118	0,074	0,134
nicht voramalg.	0,409	0,409	0,409	0,519
Luxalloy	0,154	0,104	0,126	0,131
non gamma 2	0,409	0,430	0,430	0,430
A - 76	0,067	0,133	0,101	0,060
non gamma 2	0,409	0,430	0,409	0,409
Shofu Spherical	0,092	0,110	0,096	0,101
Zinc λ	0,409	0,409	0,409	0,409
Shofu Spherical	0,061	0,162	0,089	0,186
non Zinc 8 M	0,409	0,409	0,409	0,454
True Dentalloy	0,132	0,201	0,125	0,035
A cut	0,409	0,430	0,409	0,430
True Dentalloy	0,206	0,158	0,083	0,149
Zinc free	0,409	0,430	0,409	0,409

Tab. 4: Zeile 1: Maximalabweichung a
Zeile 2: Lösung c

Tabelle 4 zeigt, daß die Meßwerte der jeweiligen Amalgamsorten der vier Prüfmethoden einer normalverteilten Grundgesamtheit entstammen.

$$F(x) = \frac{1}{s\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{x} e^{-\frac{1}{2}\left(\frac{v-u}{s}\right)^2} dv$$

$$(-\infty < x < \infty,\ s > 0)$$

6.6 Test auf Homogenität der Varianzen

Der Bartlett-Test

Mittels des Bartlett-Tests (25) soll ermittelt werden, ob die Varianzen bei den einzelnen Amalgamsorten je Prüfmethode homogen sind.

Nullhypothese H_o : Die Varianzen der 10 Amalgamsorten je Prüfmethode sind gleich. $s_1 = s_2 = ... s_n$.

Gegenhypothese H : Die Varianzen sind nicht gleich.
$s_1 \neq s_2 \neq ... \neq s_n$.

Vorgehen:

1. Berechnung der χ^2 : $\chi^2 = \frac{1}{c} \left[2{,}3026 \; (v \cdot \lg s^2 - \sum_{i=1}^{k} v_i \lg s_i^2) \right]$

$$\text{mit} \quad c = \frac{\sum_{i=1}^{k} \frac{1}{v_i} - \frac{1}{v}}{3\,(k-1)} + 1$$

$$s^2 = \frac{\sum_{i=1}^{k} v_i s_i^2}{v} \qquad \text{und FG} = k-1$$

$v = n-k$ = Gesamtzahl der Freiheitsgrade = $\sum_{i=1}^{k} v_i$

n = Gesamtstichprobenumfang

k = Anzahl der Gruppen: Jede Gruppe muß mindestens 5 Beobachtungen enthalten.

s^2 = Schätzung der gewogenen Varianz

v_i = Anzahl der Freiheitsgrade in der i-ten Gruppe = $n_i - 1$

s_i^2 = Schätzung der Varianz der i-ten Gruppe

2. Wahl der Signifikanzzahl $\alpha = 5\ \%$

3. Erreicht oder übersteigt die Prüfgröße χ^2 die für die geforderte statistische Sicherheit gegebene Signifikanzschranke c, so ist die Nullhypothese $s_1^2 = s_2^2 = \cdots\cdots = s_n^2$ abzulehnen (c s. Tafel der Chi-Quadrat-Verteilung).

Die Anzahl der Freiheitsgrade FG beträgt 9 und $\alpha = 5\ \%$.

Daraus folgt : c = 16,92

	χ^2	
Vickershärte	$32{,}81 \geq c$	$\longrightarrow s_1^2 \neq s_2^2 \neq \ldots\ldots \neq s_{10}^2$
Druckfestigkeit	$33{,}34 \geq c$	$\longrightarrow s_1^2 \neq s_2^2 \neq \ldots\ldots \neq s_{10}^2$
Biegefestigkeit	$8{,}41 < c$	$\longrightarrow s_1^2 = s_2^2 = \ldots\ldots = s_{10}^2$
tensile strength	$5{,}83 < c$	$\longrightarrow s_1^2 = s_2^2 = \ldots\ldots = s_{10}^2$

Tab. 5: Prüfgrößen χ^2

Bei der Vickershärte und Druckfestigkeit sind die Varianzen nicht homogen, d.h. H_o wird verworfen.

6.7 Die Mittelwertvergleiche nach der parametrischen oder klassischen Methode

In diesem Abschnitt sollen zunächst die Mittelwertvergleiche nach der parametrischen Methode erfolgen, obwohl bei der Vickershärte- und Druckfestigkeitsprüfung die Voraussetzungen dafür nicht vollständig gegeben sind, nämlich die Homogenität der Varianzen.

Zunächst muß geklärt werden, welches Testverfahren geeignet ist, um die Unterschiede der Mittelwerte auf Signifikanz zu prüfen.

Der von W.S. GOSSET im Jahre 1908 unter dem Pseudonym "Student" veröffentlichte t-Test kann hier nicht das Mittel der Wahl sein, da die Anzahl der Mittelwerte $k > 2$ ist. Bei $k > 2$ verliert er an Schärfe, der Fehler 1. Art wird mit zunehmender Zahl der Mittelwerte größer.

"Wir denken uns die k Stichprobenmittel nach der Größe geordnet und vereinbaren für das ganze Verfahren einen bestimmten Wert für die statistische Sicherheit, zum Beispiel $\alpha_2 = 0{,}95$. Es läßt sich zeigen, daß die statistische Sicherheit für den Vergleich des ersten mit dem dritten Mittelwert in der Reihe der geordneten Mittelwerte, sie sei α_3, nur noch 87,8 % statt 95 % beträgt. Wird der erste mit dem vierten Mittelwert verglichen, so beträgt für diesen Vergleich die statistische Sicherheit α_4 nur noch 79,7 %. Bei dem Vergleich des ersten mit dem siebenten Mittelwert ist die statistische Sicherheit α_7 auf 55,4 % abgesunken. Die α_3, α_4, ... α_n heißen statistische Sicherheiten höherer Ordnung. Das bedeutet, die kleinste Wahrscheinlichkeit, keine falschen signifikanten Differenzen z.B. zwischen vier Mittelwerten zu finden, ist 79,7 % statt 95 %. Diese Wahrscheinlichkeit ist aber zu niedrig.

Auch 87,8 % stellt eine zu kleine Wahrscheinlichkeit dar, um sichere Entscheidungen treffen zu können.

Damit ist gezeigt, daß der t-Test an Schärfe verliert, d.h. der Fehler 1. Art wird größer, wenn er bei einer Reihe von $k(k>2)$ Mittelwerten angewandt wird" (28).

Aufgrund der Unzulänglichkeit des t-Tests wird die einfache Varianzanalyse und der Scheffé-Test durchgeführt.

6.7.1 Varianzanalyse

Vorgehen: (13)

1. Berechnung von

$$q_1 = \sum_{i=1}^{k} n_i(\bar{x}_i - \bar{x})^2 \quad \text{und} \quad q_2 = \sum_{i=1}^{k} \sum_{l=1}^{n_i} (x_{il} - \bar{x}_i)^2$$

$\bar{x}_i$ = Mittelwerte der Gruppen

$\bar{x}$ = Mittelwert der gesamten Stichprobe

2. Bildung des Quotienten

$$v_o = \frac{q_1/(k-1)}{q_2/(n-k)}$$

3. Wahl der Signifikanzzahl $\alpha = 5\ \%$

4. Bestimmung der Lösung c der Gleichung

$$P(V \leq c) = 1-\alpha$$

aus der Tafel der F-Verteilung mit (k-1, n-k) Freiheitsgraden.

Ist $v_o \leq c$, so wird die Nullhypothese $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = ... = \bar{x}_n$ angenommen. Ist $v_o > c$, so wird sie verworfen.

Variation	FG	Quadratsumme	Durchschnittsquadrat
Zwischen den Gruppen	k-1	q_1	$q_1/(k-1)$
Innerhalb den Gruppen	n-k	q_2	$q_2/(n-k)$
Insgesamt	n-1	q	

Tab. 6: Einfache Varianzanalyse

Variation	FG	Quadratsumme	Durchschnittsquadrat
Zwischen d. Gruppen	9	8799,67	977,74
Innerhalb d. Gruppen	90	1788,90	19,88
Insgesamt	99	10588,57	

F-Wert = 49,19 c = 1,99 H_0 wird verworfen.

Tab. 7: Varianzanalyse Vickershärte

Variation	FG	Quadratsumme	Durchschnittsquadrat
Zwischen d. Gruppen	9	64519,92	7168,88
Innerhalb d. Gruppen	89	20966,75	235,58
Insgesamt	98	85486,67	

F-Wert = 30,43 c = 1,99 H_0 wird verworfen.

Tab. 8: Varianzanalyse Druckfestigkeit

Variation	FG	Quadratsumme	Durchschnittsquadrat
Zwischen d. Gruppen	9	18774,75	2086,08
Innerhalb d. Gruppen	85	6298,18	74,10
Insgesamt	94	25072,93	

F-Wert = 28,15 c = 1,99 H_0 wird verworfen.

Tab. 9: Varianzanalyse Biegefestigkeit

Variation	FG	Quadratsumme	Durchschnittsquadrat
Zwischen d. Gruppen	9	1078,51	119,83
Innerhalb d. Gruppen	76	2979,98	39,21
Insgesamt	85	4058,49	

F-Wert = 3,06 c = 2,01 H_0 wird verworfen.

Tab. 10: Varianzanalyse tensile strength

6.7.2 Der Scheffé-Test

Die Varianzanalyse hat schlechthin zu signifikanten Befunden geführt. Man will nun herausfinden, welche der Parameter $\bar{x}_1$, $\bar{x}_2$, $\bar{x}_3$ ..... $\bar{x}_{10}$ bzw. welche Gruppen von Parametern mit den Mittelwerten X_1, X_2 usw. sich unterscheiden.

Dies soll mit Hilfe des Scheffé-Tests oder der S-Methode ermittelt werden.

SCHEFFÉ (28) hat gezeigt, daß alle denkbaren Kontraste durch eine Menge von Konfidenzintervallen überdeckt werden, die gegeben sind durch

$$L - Ss_1 \leqq L \leqq L + Ss_1$$

worin $$S = \sqrt{(k-1)\, F_{(k-1;\ n-k;\ \alpha)}}$$

und $$s_1 = \sqrt{s_{in}^2 \sum_{i=1}^{k} \frac{c_i^2}{n_i}} \qquad s_{in}^2 = MQ_{innerhalb}$$

ist. (10 u. 11)

Der Scheffé-Test ist ein konservativer Test, da die Konfidenzintervalle relativ lang sind. Man verwendet ihn hauptsächlich für komplizierte Intervalle. Außerdem brauchen bei ihm die Gruppen nicht gleich besetzt zu sein.

	5	6	9	8	7	2	4	10	3	1
5 Luxalloy		15,86	16,76	19,89	23,07	25,99	26,09	26,28	32,08	35,15
non gamma 2		8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
6 A - 76			0,90	4,03	7,21	10,13	10,23	10,42	16,22	19,29
non gamma 2			8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
9 True Dentalloy				3,13	6,31	9,23	9,33	9,52	15,32	18,39
A cut				8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
8 Shofu Spherical					3,18	6,10	6,19	6,39	12,19	15,26
non Zinc 8 M					8,43	8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
7 Shofu Spherical						2,92	3,01	3,20	9,00	12,07
Zinc λ						8,43	8,43	8,43	8,43	8,43
2 Standalloy							0,10	0,29	6,09	9,16
voramalgamiert							8,43	8,43	8,43	8,43
4 Standalloy								0,19	6,00	9,06
nicht voramalg.								8,43	8,43	8,43
10 True Dentalloy									5,80	8,87
Zinc free									8,43	8,43
3 Standalloy F										3,07
nicht voramalg.										8,43
1 Standalloy F										
voramalgamiert										

Tab. 11: Scheffé-Test Vickershärte

	5	6	10	4	9	7	3	8	1	2
5 Luxalloy non gamma 2		17,82 29,82	36,86 29,82	37,03 29,82	48,90 29,82	62,33 29,82	66,95 29,82	72,80 29,82	79,13 29,82	81,02 29,82
6 A - 76 non gamma 2			19,04 29,03	19,21 29,03	31,08 29,03	44,51 29,03	49,12 29,03	54,98 29,03	61,30 29,03	64,19 29,03
10 True Dentalloy Zinc free				0,17 29,03	12,04 29,03	25,47 29,03	30,08 29,03	35,94 29,03	42,26 29,03	45,15 29,03
4 Standalloy nicht voramalg.					11,87 29,03	25,31 29,03	19,92 29,03	35,77 29,03	42,10 29,03	44,99 29,03
9 True Dentalloy A cut						13,43 29,03	18,05 29,03	23,90 29,03	30,22 29,03	33,11 29,03
7 Shofu Spherical Zinc λ							4,61 29,03	10,46 29,03	16,79 29,03	19,68 29,03
3 Standalloy F nicht voramalg.								5,85 29,03	12,18 29,03	15,07 29,03
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M									6,33 29,03	9,22 29,03
1 Standalloy F voramalgamiert										2,89 29,03
2 Standalloy voramalgamiert										

Tab. 12: Scheffé-Test Druckfestigkeit

	3	8	7	9	2	6	4	10	1	5
2 Standalloy F nicht voramalg.		9,72 16,75	12,50 16,75	25,20 17,18	30,40 16,75	34,02 17,18	36,35 16,75	37,40 17,18	38,04 16,75	47,42 17,18
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M			3,77 16,30	15,48 16,75	20,67 16,30	24,29 16,75	26,62 16,30	27,67 16,75	28,32 16,30	37,70 16,75
7 Shofu Spherical Zinc λ				11,70 16,75	16,90 16,30	20,52 16,75	22,85 16,30	23,90 16,75	24,54 16,30	33,93 16,75
9 True Dentalloy A cut					5,20 16,75	8,82 17,18	11,15 16,75	12,20 17,18	12,84 16,75	22,22 17,18
2 Standalloy voramalgamiert						3,62 16,75	5,95 16,30	7,00 16,75	7,64 16,30	17,03 16,75
6 A - 76 non gamma 2							2,33 16,75	3,38 17,18	4,02 16,75	13,41 17,18
4 Standalloy nicht voramalg.								1,05 16,75	1,69 16,30	11,08 16,75
10 True Dentalloy Zinc free									0,64 16,75	10,03 17,18
1 Standalloy F voramalgamiert										9,38 16,75
5 Luxalloy non gamma 2										

Tab. 13: Scheffé-Test Biegefestigkeit

	4	6	9	1	8	10	7	3	5	2
4 Standalloy nicht voramalg.		5,34 13,74	6,53 14,02	7,20 14,37	7,59 14,37	8,07 13,74	8,62 13,74	9,70 13,74	13,73 14,02	14,75 15,36
6 A - 76 non gamma 2			1,19 12,22	1,86 12,62	2,25 12,62	2,74 11,90	3,30 11,90	4,36 11,90	8,39 12,22	9,42 13,74
9 True Dentalloy A cut				0,67 12,93	1,06 12,93	1,54 12,22	2,10 12,22	3,17 12,11	7,20 12,54	8,22 14,02
1 Standalloy F voramalgamiert					0,39 13,30	0,88 12,62	1,43 12,62	2,50 12,62	6,53 12,93	7,56 14,37
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M						0,49 12,62	1,04 12,62	2,11 12,62	6,14 12,93	7,16 14,37
10 True Dentalloy Zinc free							0,55 11,90	1,62 11,90	5,65 12,22	6,70 13,74
7 Shofu Spherical Zinc λ								1,07 11,90	5,10 12,22	6,13 13,74
3 Standalloy F nicht voramalg.									4,03 12,22	5,06 13,74
5 Luxalloy non gamma 2										1,03 14,02
2 Standalloy voramalgamiert										

Tab. 14: Scheffé-Test tensile strength

Erläuterung der Tabellen 11 bis 14

Die Amalgamsorten werden gemäß der Größe ihrer Mittelwerte (s. Tab. 3) hintereinander angeordnet. In der ersten Zeile der jeweiligen Spalten steht die Differenz der Mittelwerte zweier Amalgamsorten und in der zweiten Zeile der jeweiligen Spalten die für die geforderte statistische Sicherheit S = 95 % gegebene Signifikanzschranke c. Erreicht oder übersteigt c die Differenz der Mittelwerte, so ist die Nullhypothese, daß die Mittelwerte gleich sind, anzunehmen.

Die unterstrichenen Werte signalisieren die Gleichheit zweier Mittelwerte.

Erläuterung der Tabellen 15 bis 17

Amalgamsorten mit gleichen Mittelwerten werden nun zu Gruppen zusammengefaßt, wobei die in Gruppe A die größten Mittelwerte besitzen, die gleich sind, z.B. $\bar{x}_1 = \bar{x}_2 = \bar{x}_3 = X_1$, und die in Gruppe E die kleinsten Mittelwerte besitzen, z.B. $\bar{x}_8 = \bar{x}_9 = \bar{x}_{10} = X_5$ und $X_1 \cong X_5$ (s. 6.7.2 Scheffé-Test). Weiter ist ersichtlich, daß sich die Gruppen überschneiden können. Zum Beispiel gehört bei der Biegefestigkeit A - 76 hinsichtlich seines Mittelwertes sowohl zu Gruppe C als auch zu Gruppe D, der letzten in diesem Falle.

Bei "tensile strength" hat der Scheffé-Test keine signifikanten Unterschiede der Mittelwerte erkennen lassen.

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C	Gruppe D	Gruppe E
Luxalloy non gamma 2				
	A - 76 non gamma 2			
	True Dentalloy A cut			
	Shofu Spherical non Zinc 8 M	Shofu Spherical non Zinc 8 M		
	Shofu Spherical Zinc λ	Shofu Spherical Zinc λ		
		Standalloy voramalgamiert	Standalloy voramalgamiert	
		Standalloy nicht voramalg.	Standalloy nicht voramalg.	
		True Dentalloy Zinc free	True Dentalloy Zinc free	
			Standalloy F nicht voramalg.	Standalloy F nicht voramalg.
				Standalloy F voramalgamiert

Tab. 15: Scheffé-Test Vickershärte
Gruppen gleicher Mittelwerte

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C	Gruppe D	Gruppe E
Luxalloy non gamma 2				
A - 76 non gamma 2	A - 76 non gamma 2			
	True Dentalloy Zinc free			
	Standalloy nicht voramalg.	Standalloy nicht voramalg.		
		True Dentalloy A cut	True Dentalloy A cut	
		Shofu Spherical Zinc λ	Shofu Spherical Zinc λ	Shofu Spherical Zinc λ
			Standalloy F nicht voramalg.	Standalloy F nicht voramalg.
			Shofu Spherical non Zinc 8 M	Shofu Spherical non Zinc 8 M
				Standalloy F voramalgamiert
				Standalloy voramalgamiert

Tab. 16: Scheffé-Test Druckfestigkeit
Gruppen gleicher Mittelwerte

Gruppe A	Gruppe B	Gruppe C	Gruppe D
Standalloy F nicht voramalg.			
Shofu Spherical non Zinc 8 M	Shofu Spherical non Zinc 8 M		
Shofu Spherical Zinc λ	Shofu Spherical Zinc λ		
	True Dentalloy A cut	True Dentalloy A cut	
		Standalloy voramalgamiert	
		A - 76 non gamma 2	A - 76 non gamma 2
		Standalloy nicht voramalg.	Standalloy nicht voramalg.
		True Dentalloy Zinc free	True Dentalloy Zinc free
		Standalloy F voramalgamiert	Standalloy F voramalgamiert
			Luxalloy non gamma 2

Tab. 17: Scheffé-Test Biegefestigkeit
Gruppen gleicher Mittelwerte

6.8 Die Mittelwertvergleiche nach der parameterfreien oder verteilungsfreien Methode

Da bei der Vickershärte- und Druckfestigkeitsprüfung die Voraussetzungen für das Vorgehen nach der klassischen Methode nicht vollständig erfüllt waren, soll hier ergänzend die parameterfreie Methode zum Vergleich der Mittel- bzw. Medianwerte vorgestellt werden.

6.8.1 Der H-Test von KRUSKAL und WALLIS

Der Test von KRUSKAL und WALLIS (25, 28) dient der Prüfung, ob drei oder mehr unabhängige Stichproben aus der gleichen Grundgesamtheit stammen. Das Prüfverfahren stellt eine einfache Varianzanalyse dar.

Nullhypothese H_0: Die Stichproben stammen aus der gleichen Grundgesamtheit, d.h. die verschiedenen Mittel- bzw. Medianwerte unterscheiden sich nicht.

Gegenhypothese H: Die Stichproben stammen nicht aus der gleichen Grundgesamtheit, d.h. die verschiedenen Mittel- bzw. Medianwerte unterscheiden sich.

Vorgehen:

1. Jedem Meßwert wird eine Rangzahl so zugeordnet, daß eine einzige Reihe von Rangzahlen entsteht. Der kleinste Meßwert erhält die Rangzahl 1, der nächst größere die Rangzahl 2, der größte die Rangzahl n. Dann wird die Summe der Rangzahlen in jeder Stichprobe gebildet. R_i ist die Summe der Rangzahlen in der i-ten Stichprobe.

Es gilt

$$\sum_{i=1}^{k} R_i = \frac{n(n+1)}{2}$$

$\bar{R}_i$ ist die mittlere Rangzahl in der i-ten Stichprobe

$$\bar{R}_i = \frac{R_i}{n_i}$$

$\bar{\bar{R}}$ ist der Gesamtdurchschnitt der Rangzahlen

$$\bar{\bar{R}} = \frac{1}{n} (1+2+ \ldots . +n) = \frac{n+1}{2}$$

2. Berechnung von H

$$H = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^{k} n_i (\bar{R}_i - \bar{\bar{R}})^2 = \frac{12}{n(n+1)} \sum_{i=1}^{k} \frac{R_i^2}{n_i} - 3(n+1)$$

3. Wahl der Signifikanzzahl $\alpha = 5\ \%$

4. Da $k \geq 3$ und $n_i > 5$ ist, wird eine Chi-Quadrat-Verteilung zugrunde gelegt und zur Beurteilung dieselbe Tafel wie beim Bartlett-Test herangezogen.

5. Ist der Wert von H gleich oder größer als die für die geforderte statistische Sicherheit gegebene Signifikanzschranke c, so wird die Nullhypothese abgelehnt.

Aus der Tafel der Chi-Quadrat-Verteilung geht hervor, daß bei $\alpha = 5\ \%$ und Anzahl der Freiheitsgrade FG = 9 der Wert von c = 16,92 ist.

	H
Vickershärte	77,31 ≧ c
Druckfestigkeit	77,20 ≧ c
Biegefestigkeit	67,02 ≧ c
tensile strength	21,46 ≧ c

Tab. 18: H-Werte

Aus Tab. 18 folgt, daß sich die Mittel- bzw. Medianwerte signifikant unterscheiden, d.h. die Nullhypothese wird abgelehnt.

6.8.2 Der U-Test von WILCOXON, MANN und WHITNEY

Der U-Test (25, 28) ist das verteilungsunabhängige Gegenstück zum parametrischen t-Test für den Vergleich zweier Mittelwerte stetiger Verteilungen. Er ist empfindlich gegenüber Medianunterschieden, weniger empfindlich bei unterschiedlichen Schiefen und unempfindlich für Varianzunterschiede und ist eines der schärfsten nichtparametrischen Prüfverfahren.

Der U-Test wird hier ergänzend zum H-Test eingeführt um zu prüfen, welche Amalgame sich hinsichtlich ihrer Mittel- bzw. Medianwerte unterscheiden.

Vorgehen:

1. Man bringt die Meßwerte in eine gemeinsame aufsteigende Rangfolge, wobei zu jeder Rangzahl vermerkt wird, aus welcher der beiden Amalgamsorten der zugehörige Wert stammt. Die Summe der auf Amalgamsorte 1 entfallenden Rangzahlen sei R_1, die Summe der auf Amalgamsorte 2 entfallenden Rangzahlen sei R_2.

2. Berechnung von:

$$U_1 = n_1 n_2 + \frac{n_1(n_1+1)}{2} - R_1$$

$$U_2 = n_1 n_2 + \frac{n_2(n_2+1)}{2} - R_2 \qquad U_1+U_2=n_1 n_2$$

Die gesuchte Größe ist die kleinere der beiden Größen U_1 und U_2.

3. Wahl der Signifikanzzahl $\alpha = 5\ \%$

4. Ist der berechnete U-Wert kleiner oder gleich dem kritischen Wert $U_{o(n_1,\ n_2;\ \alpha)}$ (U_o s. Tabelle), so wird die Nullhypothese, daß die Mittel- bzw. Medianwerte gleich sind, verworfen.

Bei den Tab. 19-22 markieren die Unterstrichenen Werte Gleichheit der Mittelwerte.

Gruppen gleicher Mittelwerte lassen sich mit Hilfe des U-Tests nicht ermitteln, wie das beim Scheffé-Test der Fall war.

	5	6	9	8	7	2	4	10	3	1
5 Luxalloy non gamma 2		0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23
6 A - 76 non gamma 2			46,5 23	32,0 23	26,5 23	5,0 23	1,0 23	3,5 23	0,0 23	0,0 23
9 True Dentalloy A cut				33,0 23	25,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M					39,0 23	18,5 23	13.5 23	16,5 23	4,0 23	0,0 23
7 Shofu Spherical Zinc λ						36,5 23	34,0 23	36,0 23	14,0 23	9,0 23
2 Standalloy voramalgamiert							44,5 23	47,0 23	8,5 23	0,0 23
4 Standalloy nicht voramalg.								48,5 23	1,0 23	0,0 23
10 True Dentalloy Zinc free									8,0 23	0,0 23
3 Standalloy F nicht voramalg.										20,5 23
1 Standalloy F voramalgamiert										

Tab. 19: U-Test Vickershärte

	5	6	10	4	9	7	3	8	1	2
5 Luxalloy non gamma 2		28,5 20	2,0 20	5,0 20	0,0 20	1,0 20	0,0 20	0,0 20	0,0 20	0,0 20
6 A - 76 non gamma 2			24,5 23	26,5 23	9,5 23	5,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23
10 True Dentalloy Zinc free				46,0 23	11,5 23	11,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23	0,0 23
4 Standalloy nicht voramalg.					16,5 23	14,0 23	2,0 23	2,0 23	0,0 23	1,0 23
9 True Dentalloy A cut						31,0 23	2,0 23	6,0 23	0,0 23	2,0 23
7 Shofu Spherical Zinc λ							42,0 23	31,0 23	27,0 23	22,0 23
3 Standalloy nicht voramalg.								44,0 23	19,0 23	15,0 23
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M									31,5 23	35,0 23
1 Standalloy F voramalgamiert										40,0 23
2 Standalloy voramalgamiert										

Tab. 20: U-Test Druckfestigkeit

	3	8	7	9	2	6	4	10	1	6
3 Standalloy F nicht voramalg.		19,0 20	11,0 20	0,0 17	0,0 20	0,0 17	0,0 20	0,0 17	0,0 20	0,0 17
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M			38,0 23	10,0 20	5,0 23	4,0 20	3,0 23	2,0 20	0,0 23	0,0 20
7 Shofu Spherical Zinc λ				16,0 20	13,0 23	4,0 20	4,0 23	2,0 20	0,0 23	0,0 20
9 True Dentalloy A cut					30,0 20	14,0 17	13,0 20	8,0 17	3,0 20	2,0 17
2 Standalloy voramalgamiert						35,0 20	30,0 23	28,0 20	26,0 23	10,0 20
6 A - 76 non gamma 2							39,0 20	34,0 17	33,0 20	12,0 17
4 Standalloy nicht voramalg.								43,0 20,0	46,0 23	19,0 20
10 True Dentalloy Zinc free									43,0 20	19,0 17
1 Standalloy F voramalgamiert										18,0 20
5 Luxalloy non gamma 2										

Tab. 21: U-Test Biegefestigkeit

	4	6	9	1	8	10	7	3	5	2
4 Standalloy nicht voramalg.		14,0 11	9,0 10	11,0 8	9,0 8	7,0 11	8,0 11	4,0 11	0,0 8	2,0 5
6 A - 76 non gamma 2			39,0 20	35,0 17	33,0 17	37,0 23	33,0 23	28,0 23	11,0 20	10,0 11
9 True Dentalloy A cut				35,0 15,	35,0 15	38,0 20	34,0 20	33,0 20	13,0 17	11,0 10
1 Standalloy F voramalgamiert					30,0 13	37,0 17	34,0 17	29,0 17	20,0 15	10,0 8
8 Shofu Spherical non Zinc 8 M						37,0 17	37,0 17	32,5 17	19,0 15	12,0 8
10 True Dentalloy Zinc free							47,5 23	40,0 23	21,5 20	14,0 11
7 Shofu Spherical Zinc λ								46,0 23	25,0 20	16,0 11
3 Standalloy F nicht voramalg.									29,0 20,0	16,0 11,0
5 Luxalloy non gamma 2										21,0 10,0
2 Standalloy voramalgamiert										

Tab. 22: U-Test tensile strength

6.9 Zusammenfassung der statistischen Auswertungen

Der Vergleich der Mittelwerte nach der klassische Methode muß hier als der optimalere angesehen werden, wenn auch bei der Härteprüfung nach VICKERS und der Druckfestigkeitsprüfung die Voraussetzung Gleichheit der Varianzen nicht gegeben ist.

Mit Hilfe des Scheffé-Tests gelingt eine Gruppeneinteilung, bei der Amalgamsorten bezüglich ihrer gleichen Mittelwerte zusammengefaßt werden. Das ist beim verteilungsfreien U-Test nicht möglich (25).

Zum U-Test wäre folgendes hinzuzufügen: "Da die Teststatistik U eine ziemlich komplizierte Funktion des Mittelwertes, der Wölbung und der Schiefe ist - der U-Test also nicht lediglich Mittel- oder Medianwerte vergleicht -, muß betont werden, daß mit zunehmendem Verteilungsunterschied der beiden Grundgesamtheiten die Signifikanzschranken (hinsichtlich der Hypothese auf Unterschiede zweier Median- bzw. Mittelwerte allein) unzuverlässig werden" (25).

Abgesehen von der Frage, ob die klassische oder die verteilungsfreie Methode die bessere ist, können zwei Feststellungen eindeutig getroffen werden:

1. Die 10 Amalgamsorten unterscheiden sich bezüglich ihrer Mittelwerte beim Verformungsversuch "tensile strength" nicht. Das hat im wesentlichen auch der U-Test gezeigt. Die statistische Sicherheit S hätte beim Verformungsversuch "tensile strength" durchaus 99 % betragen dürfen, da aufgrund der vielen Ausreißer teilweise nur 6 Meßwerte je Stichprobe zur Auswertung vorhanden waren und somit die Testschärfe herabgesetzt war (s.S. 46). Beispielsweise ist beim H-Test tensile strength der kritische Wert c = 21,67 bei einer geforderten statistischen Sicherheit S = 99 %. Daraus folgt $c > 21{,}46$ (s.Tab. 18), d.h. die Mittelwerte unterscheiden sich nicht.

2. Die "Gamma 2"-freien Amalgame Luxalloy non gamma 2 und A - 76 non gamma 2 sind durch hohe Vickershärtewerte und Druckfestigkeitswerte charakterisiert, was bereits Seite 6 erwähnt worden ist. Dagegen weisen sie bezüglich der Biegefestigkeit mit die niedrigsten Werte aus.

7. INWIEFERN GEBEN DIE VIER PROFMETHODEN DIE KLINISCHEN VERHÄLTNISSE WIEDER, UND WAS SAGEN SIE OBER DIE HALTBARKEIT DER AMALGAMFOLLUNG IM MUNDE AUS?

7.1 Vickershärte

Die Vickershärte eines Amalgames sagt über dessen Brauchbarkeit als Füllungsmaterial im Munde eines Patienten nicht viel aus. Sie ist mehr oder weniger eine technische Größe. In gewissen Grenzen ist durch ihre Kenntnis ein Rückschluß auf die Zugfestigkeit des Materials möglich (7). Die Amalgamfüllung im Munde unterliegt jedoch von Seiten der Antagonisten beim Kauvorgang keiner Beanspruchung auf Zug. Deshalb ist der Zugversuch im Laboratorium in Bezug auf die klinischen Verhältnisse bedeutungslos. Will man dennoch die Zugspannungen der Amalgame ermitteln, so muß man sich darüber im klaren sein, daß relativ niedrige Werte anfallen, die der wahren Festigkeit des Werkstoffes nicht entsprechen, da Amalgam sehr spröde ist (s.S. 31 und 32).

7.2 Druckfestigkeit

Die Größe der Muskelkraft ist uns durch die Muskelstärke der paarigen vier Kaumuskeln, Musculus temporalis, Musculus masseter, Musculus pterygoideus medialis und lateralis angezeigt. Außer der Größe der Kraft ist ihre Richtung von großer Bedeutung, die uns durch die Unterkieferbewegung gegeben ist. Gerichtete Kräfte werden durch Vektoren dargestellt. Man spricht in der Zahnheilkunde von einem sogenannten mittleren Kaukraftvektor, der durch die Kraftgröße der Kaumuskulatur und die Richtung der Unterkieferbewegung gegeben ist. Im günstigsten Falle verläuft der mittlere Kaukraftvektor in einer zentrischen Okklusion in Richtung auf die physiologische Zahnachse.

Dann kann die Muskelkraft auf ein Maximum ansteigen, da der kollagene Bandapparat in seiner funktionellen Struktur von der Natur für diese Belastungsrichtung vorgesehen ist (12).

Der Kaudruck verringert sich aber zu den Schneidezähnen hin wegen der zunehmenden Länge des Unterkiefers, der als Hebelarm angesehen werden muß. Der Drehpunkt des Hebelarmes liegt in einem Kaufeld, auf das sich die Hauptkraft der Kaumuskulatur konzentriet. Dieser Teil wird als Kaukraftzentrum bezeichnet, und es liegt nach H.SCHRÖDER im Interkuspitationsbereich zwischen Praemolaren und Molaren (12).

Nach E.WEBER ist die Größe der Kaukraft vom Querschnitt der Schließmuskeln der Kaumuskulatur abhängig, der insgesamt 40 cm^2 betragen soll. Pro cm^2 können nach H.SCHRÖDER 10 kp Kraft aufgebracht werden, sodaß die Gesamtkraft der Schließmuskeln 400 kp beträgt. Dieser Wert muß jedoch beim Kulturmenschen als absolutes Maximum angesehen werden (20).

Nach LEHMANN beträgt die Kraft, der der einzelne Zahn im Durchschnitt ausgesetzt ist, 15 kp ≈ 150 N. Je größer die Oberfläche der Zahnwurzel ist und damit die Anzahl der Fibrae dentoalveolares, desto größer kann die Kraft sein, die auf den Zahn wirkt. Der Maximalwert der Kraft liegt beim Molaren bei ca. 80 kp ≈ 800 N. Allerdings soll eine derartige Kraft bereits Schmerzen und Schäden im Desmodont hinterlassen (17). Karlheinz KÖRBER glaubt dagegen, daß beim physiologischen Kauvorgang die Kaukraftmaxima, die auf den einzelnen Zahn entfallen, zwischen 2 kp und 5 kp liegen und nur unverhältnismäßig stark beim Bruxismus anschwellen, wo sie Werte von 20 kp bis 30 kp erreichen können (12).

Die Werte von KÖRPER liegen im Gegensatz zu anderen Autoren relativ niedrig. Schon BLACK hat mit Hilfe seines Gnathodynamometers Kräfte von 77,7 kp ≈ 770 N ermittelt, die auf

einen Molaren eines Erwachsenen einwirken können. Dabei soll aber die Grenze der Widerstandsfähigkeit des Desmodonts erreicht sein. Die Größe von 77,7 kp stellt kein Maß für die Muskelkraft dar, die eventuell beim Abbiß- und Kauvorgang aufgewendet werden muß (20).

Die Amalgamfüllung wird nun bei den ersten Molaren gelegt, da diese nach H.SCHRÖDER im Kaukraftzentrum liegen und mit die größten Wurzeloberflächen aufweisen (Tab. 23).

Obere Zahnreihe	117	139	181	205	181	376	363	mm^2
Zähne	1	2	3	4	5	6	7	
Untere Zahnreihe	136	124	158	142	136	266	278	mm^2

Tab. 23: Zahnwurzeloberflächen in mm^2 nach MORELLI (21)

Der Kaukraftvektor soll beim Kauvorgang in Richtung der physiologischen Zahnachsen verlaufen. Ferner seien ein vollbezahnter Kiefer, zentrische Okklusion bei Schlußbiß und keine Artikulationsstörungen vorausgesetzt.

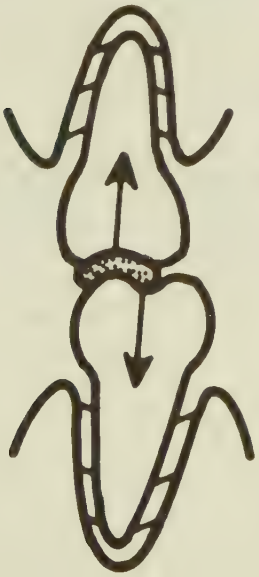

Abb. 28: Dünner Speisebolus zwischen den Zähnen und Kaukraftvektor in Richtung der physiologischen Zahnachsen

Unter diesen Voraussetzungen kann die auf die ersten Molaren entfallende Kaukraft ihr Maximum erreichen, das bei 70 kp ≈ 700 N angenommen werden soll.

Für das Rechenbeispiel wird eine dreiflächige Füllung (mod) mit buccalen und lingualen Auslegern gewählt, da die auf Druck beanspruchte Füllung bei Belastung nach buccal, lingual, mesial und distal ausbauchen kann, wie auch die Amalgamproben zwischen den Druckplatten im Laboratorium nach allen Seiten ausbauchen können.

Die einflächige,okklusale Amalgamfüllung, die allseitig von Zahnhartsubstanz umgeben ist, kann bei Belastung nicht ausbauchen, da von Seiten der Zahnhartsubstanzen ein Gegendruck wirkt. Deshalb liegt ihre zulässige Druckspannung weit über der im Laboratoriumsversuch ausgewiesenen. Allerdings dürfen die Schmelzleisten nicht zu dünn sein.

Diese von Zahnhartsubstanz umgebene Füllung wird niemals aufgrund der einwirkenden Druckkraft aus der Kavität herausgebrochen, sondern sie fällt eher wegen mangelnder Kavitätenpräparation heraus und wegen der "merkuroskopischen Expansion" (DREYER JØRGENSEN (8)) - sofern es sich um ein konventionelles Amalgam handelt -, die einen stets größer werdenden Randspalt verursacht (s.S. 6), und die damit die Entstehung von Sekundärkaries begünstigt.

Die auf Druck beanspruchte Oberfläche der mehrflächigen Füllung A_o wird nun mit 10 mm^2 festgelegt, was, betrachtet man Tab. 24, ein sehr niedriger Wert ist bei einer durchschnittlichen Präparationsbreite von 2,5 mm.

	größter Kronendurchmesser	
	mesio-distal	vestibulo-lingual
Oberkiefer		
5	6,5 (6-8)	- (8-11)
6	10,1 (8-11)	11,7 (10-13)
Unterkiefer		
5	7,3 (6-9)	8,3 (7-10)
6	11,2 (9-13)	10,3 (10-11)

Tab. 24: Durchschnittliche Größenverhältnisse der bleibenden Zähne in mm (in Klammern Minimal- und Maximalwerte). Nach DE JONGE-COHEN (1928 u. 1933) (22)

Die zulässige Druckspannung des Silberamalgames soll 300 n/mm^2 betragen.

$$300\ N/mm^2 = \frac{F_{max}}{10\ mm^2} \qquad F_{max} = 3000\ N \approx 300\ kp$$

Um die zulässige Spannung des Amalgames zu überschreiten, wäre eine Kraft von 3000 N ≈ 300 kp auf die Füllung und damit auch auf den Zahn notwendig, der jedoch nach der Voraussetzung nur einer Maximalkraft von etwa 70 kp im Munde ausgesetzt sein kann.

Die heutigen hochwertigen Silberamalgame haben alle Festigkeitswerte über 300 N/mm^2 (s. Tab. 3), sofern diese ausgehärtet sind. Deshalb ist der Druckversuch im Laboratorium bei ausgehärteten Proben für den Zahnarzt bedeutungslos. Die Hersteller von Silberamalgam brauchen ihre Produkte in Bezug auf die Druckfestigkeit nicht weiter verbessern.

7.3 Tensile strength

Die HERTZ'sche Gleichung $P_o = \frac{2 F_{max}}{\pi a l}$ bzw. die Formel

tensile stress $St = \frac{2F_{max}}{\pi d l}$ gilt,

wenn sich Zylinder und Ebene in belastetem Zustand längs einer Mantellinie des Zylinders berühren. Sie gilt auch, wenn sich zwei Zylinder längs ihrer Mantellinien in belastetem Zustand berühren, d.h. wenn zwei Körper mit gekrümmten Oberflächen aufeinandergepreßt werden (2).

Die HERTZ'sche Pressung bzw. der Verformungsversuch "tensile strength" stellt also die klinischen Verhältnisse im Laboratorium wirklichkeitsnäher dar als der Druckversuch, da die Oberfläche der Amalgamfüllung und der zahntragende Höcker des Antagonisten keine planen Ebenen sind.

Befindet sich das Kausystem bei Schlußbiß in zentrischer Okklusion, so kann man voraussetzen, daß der mittlere Kaukraftvektor in Richtung auf die physiologischen Zahnachsen verläuft. HERTZ hat in seiner 4. Voraussetzung verlangt, daß in der Druckfläche nur normal gerichtete Kräfte auftreten (3).

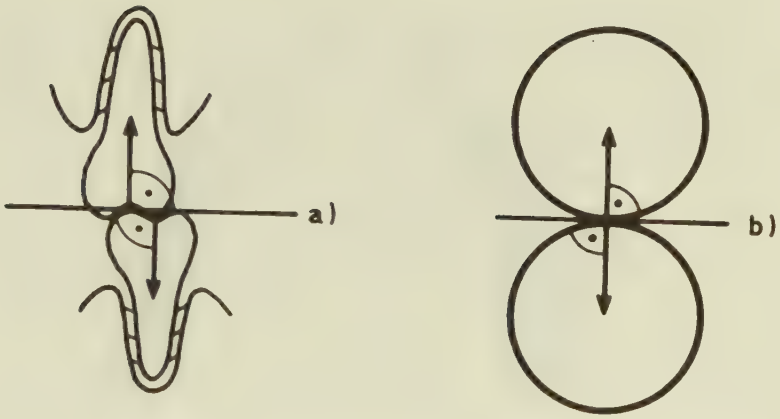

Abb. 29: a) Kausystem in zentrischer Okklusion und Kaukraftvektor in Richtung auf die physiologische Zahnachse
b) 4. HERTZ'sche Voraussetzung

Betrachtet man das Okklusionsrelief eines Kausystems in zentrischer Okklusion (Abb. 30), so liegen Kontaktpunkte von Füllung und zahntragendem Höcker des Antagonisten in etwa in einer Linie ihrer gekrümmten Oberflächen (12).

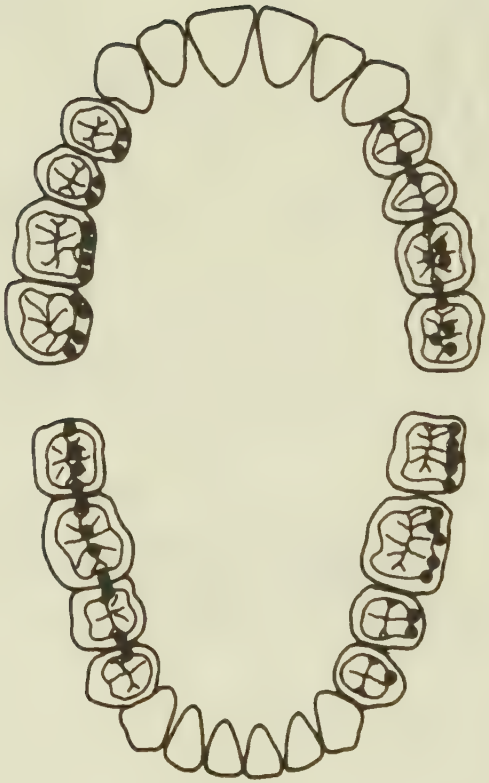

Abb. 30: Okklusionsrelief eines Kausystems in zentrischer Okklusion
(Nach KÖRBER, Kh., 1975)

Mit Hilfe des Verformungsversuches "tensile strength" lassen sich so gesehen die klinischen Verhältnisse im Laboratorium sehr gut reproduzieren.

Eine dreiflächige Amalgamfüllung (mod) wird wieder beim ersten Molaren gelegt und die Kraft berechnet, die nach dem Verformungsversuch "tensile strength" erforderlich ist, um die zulässige Vergleichsspannung oder reduzierte Spannung St des Amalgames zu überschreiten. Da sich beim Verformungsversuch "tensile strength" die Mittelwerte der Amalgamsorten nicht signifikant unterschieden haben, wird bei der Berechnung deren gemeinsamer Mittelwert von $56{,}71\ N/mm^2 \approx 57\ N/mm^2$ verwendet (s.Tab. 3). Die Länge der Füllung soll 8 mm betragen.

Auf Seite 24 wurde gezeigt, daß in der Mitte der Füllung

$$\sigma_y = P_o = St,$$
$$\sigma_z = P_o = St,$$
$$\sigma_x = 0{,}6\ P_o = 0{,}6\ St,$$
$$\tau_{max} = 0{,}2\ P_o = 0{,}2\ St$$

und am approximalen Ende der Füllung

$$\sigma_y = P_o = St,$$
$$\sigma_z = P_o = St,$$
$$\sigma_x = 0,$$
$$\tau_{max} = 0{,}5\ P_o = 0{,}5\ St \quad \text{ist.}$$

Da beim spröden Werkstoff Amalgam der Bruch der Füllung durch die auftretende Normalspannung und nicht durch die Schubspannung verursacht wird, muß die Bruchstelle möglichst im Zentrum der Füllung liegen, da hier $\sigma_x = 0{,}6\ St$ ist und nach den approximalen Enden hin auf 0 absinkt.

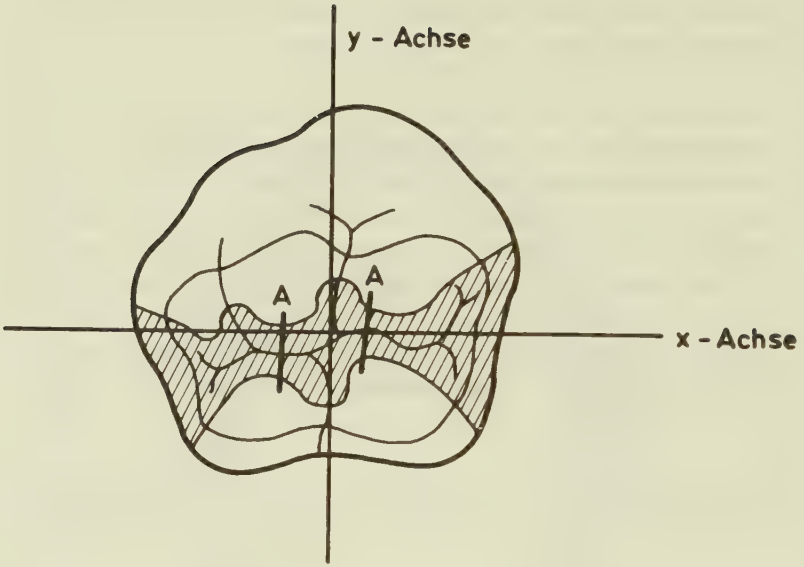

Abb. 31: Nach dem Verformungsversuch "tensile strength" liegt der gefährdete Querschnitt bei Punkt A

Der gefährdete Querschnitt liegt bei der dreiflächigen Füllung (mod) jedoch nicht genau in der Mitte, da hier der Durchmesser relativ groß ist. Im Bereich der Bruchstelle nach Abb. 31 ist σ_x jedenfalls kleiner als 0,6 St. Es soll dennoch für σ_x ein Wert von 0,6 angenommen werden. Die Normalspannungen in Richtung der y - und z-Achse sind bedeutungslos, da hier die Füllung von Zahnhartsubstanz zusätzlich Unterstützung findet. Das Absprengen der approximalen Füllungsanteile in Richtung der x-Achse sind jedem praktizierenden Zahnarzt wohlbekannt.

Der Durchmesser des gefährdeten Querschnittes soll 2 mm betragen.

$$F = \frac{St \cdot \pi \cdot d \cdot l}{2} = \frac{57\ N/mm^2 \cdot 3{,}14 \cdot 2\ mm \cdot 8\ mm}{2}$$

$$= 1432\ N \approx 150\ kp$$

Da aber $\sigma_x = 0{,}6\ St$ ist, muß die Größe der Kraft $\frac{150\ kp}{0{,}6}$ = 250 kp betragen, um die approximalen Füllungsanteile abzusprengen. Zudem wird in der Praxis die Bruchstelle sehr viel approximaler beobachtet (Abb. 32), wo $\sigma_x < 0{,}6\ St$ betragen muß.

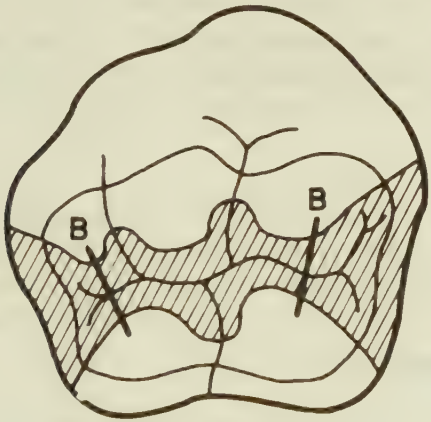

Abb. 32: Tatsächlich gefährdeter Querschnitt bei Punkt B

Demnach ist ein Amalgam im Munde des Patienten absolut bruchfest, wenn es nach dem Verformungsversuch "tensile strength" im Laboratorium eine reduzierte Spannung $St > 15\ N/mm^2$ ausweist.

Der Laboratoriumstest "tensile strength" ist wie der Druckversuch bei ausgehärteten Proben überflüssig, da die heutigen Silberamalgame zulässige reduzierte Spannungen St von etwa 50 N/mm^2 haben.

Tensile stress und Druckspannung sind also wie die Vickershärte technische Daten, die über die Haltbarkeit der Füllung im Munde des Patienten nicht viel aussagen.

Die große Zahl an Ausreißern und die relativ große Standardabweichung beim Verformungsversuch "tensile strength" sind auf eine fehlerhafte Versuchsdurchführung zurückzuführen. Nach der vierten HERTZ'schen Voraussetzung dürfen in der Druckfläche nur Normalspannungen auftreten. Da die obere der beiden Druckplatten bei der Versuchsvorrichtung kugelig gelagert war, muß angenommen werden, daß es nicht immer gelungen ist, diese genau planparallel zur unteren zu führen. Es ist dann eine Schubspannung neben einer Normalspannung in der Druckfläche entstanden.

Abb. 33: Korrekte und unkorrekte Versuchsdurchführung

Das ist unter Umständen eine Erklärung dafür, daß Bruchbild II in Abb. 17 aufgetreten ist. Da die Normalspannung beim Amalgam den Bruch der Probe verursacht, kommen aufgrund der unkorrekten Versuchsdurchführung nicht nur die kleinen Meßwerte als Ausreißer in Betracht, sondern auch die großen.

Die in Tab. 3 ausgewiesenen Mittelwerte der Amalgamsorten beim Verformungsversuch "tensile strength" sind sehr wahrscheinlich zu groß und entsprechen nicht den wahren zulässigen reduzierten Spannungen. Zum Beispiel besitzt "Standalloy nicht voramalgamiert" den größten Mittelwert von 64,89 N/mm^2. Dieser Wert kam aus folgenden 10 Messungen zustande:

69,92 N/mm^2	45,91 N/mm^2
67,36 N/mm^2	45,40 N/mm^2
67,07 N/mm^2	43,14 N/mm^2
63,21 N/mm^2	35,91 N/mm^2
61,47 N/mm^2	
60,29 N/mm^2	

Da die anderen konventionellen Degussa-Amalgame Mittelwerte von 57,69 N/mm^2, 55,19 N/mm^2 und 50,14 N/mm^2 ergeben haben, muß angenommen werden, daß die 6 hohen Meßwerte von "Standalloy nicht voramalgamiert" aufgrund einer fehlerhaften Versuchsdurchführung angefallen sind.

Bei ordnungsgemäßer Versuchsdurchführung sind beim Verformungsversuch "tensile strength" prozentual kleinere Standardabweichungen, weniger Ausreißer und signifikante Unterschiede der Amalgamsorten zu erwarten. Allerdings dürfte die Spannung St bei allen Amalgamsorten weit über 15 N/mm^2 liegen, falls die Proben ausgehärtet sind.

7.4 Biegefestigkeit

In Abbildungen 34 und 35 sollen zunächst die Grenzbewegungen des Unterkiefers in der Sagittalebene, Horizontalebene und Frontalebene dargestellt werden.

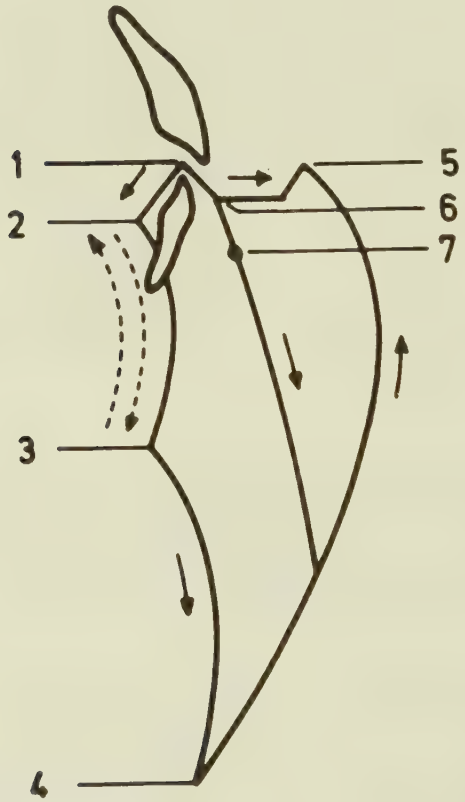

Abb. 34: Grenzbewegungen in der Sagittalebene
1: zentrische Okklusion, 2: zentrale Relation, 3: Endpunkt der Scharnierbewegung, 4: maximaler Öffnungspunkt, 5: Protrusionspunkt, 6: Abbißstellung, 7: Ruheschwebelage auf der normalen Öffnungsbahn.
(Nach KÖRBER, Kh., 1975)

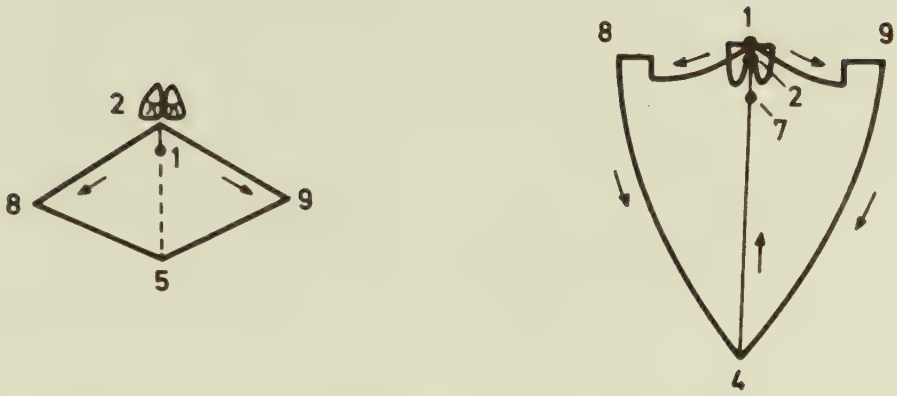

Abb. 35: Grenzbewegungen in der Horizontal- und Frontalebene
1: zentrische Okklusion, 2: zentrale Relation,
4: maximale Öffnung, 5: Protrusionsstellung,
7: Ruheschwebelage, 8: Seitwärtsstellung rechts,
9: Seitwärtsstellung links.
(Nach KÖRBER, Kh., 1975)

Das Kauen spielt sich innerhalb der Grenzbewegungen des Unterkiefers ab, wobei der Unterkiefer typische Kaubewegungen ausführt, die eine immer wiederkehrende Form erkennen lassen (12).

GYSI fand beim Kauen eine typische Bewegungsform, die er in vier Phasen unterteilte:

Phase 1
Seitwärts-Öffnung aus der Okklusionsstellung heraus:
Fassen des Bisses

Phase 2
Endphase der Öffnungsbewegung zur Kauseite hin:
Abbeißen

Phase 3
Rücklauf bis zum Balancekontakt:
Zerquetschen

Phase 4
Okklusales Gleiten in die zentrische Okklusion:
Die Speise ist zerkleinert.

Abb. 36: Vierphasen-Rundbiß nach GYSI
(Nach KÜRBER, Kh., 1975)

Aus dem Vierphasen-Rundbiß nach GYSI geht hervor, daß beim Abbeißen bis zum Zerkleinern der Speise der mittlere Kaukraftvektor nicht immer senkrecht auf die Richtung der physiologischen Zahnachse verläuft; und somit wirken auf eine Amalgamfüllung im Seitenzahngebiet die verschiedensten Normal- und Schubkräfte ein, wobei aufgrund der auftretenden Normalspannungen der Bruch der Füllung ausgelöst werden kann.

In der Praxis beobachtet man häufig das Absprengen des approximalen Füllungsanteiles einer Amalgamfüllung, was bereits erwähnt worden ist.

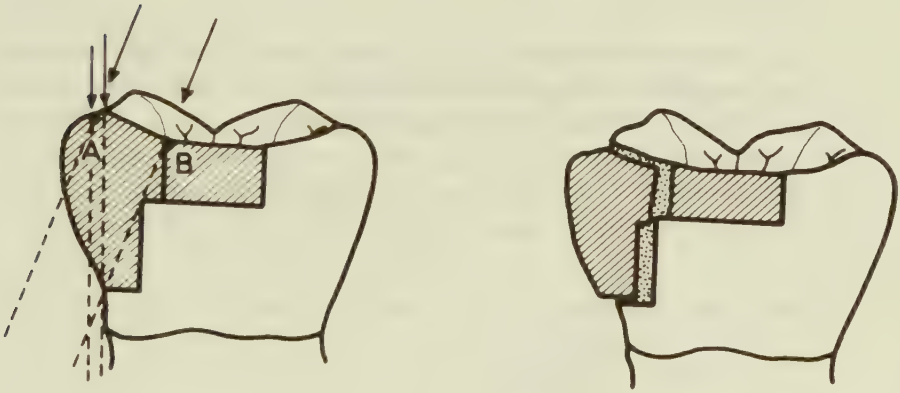

Abb. 37: Absprengen des approximalen Füllungsanteiles

Für das Absprengen des approximalen Füllungsanteiles ist die auftretende Biegespannung verantwortlich. Dabei tritt der Bruch immer im Bereich des kleinsten Querschnittes der Füllung auf, der sich in der Nähe der approximalen Stufe befindet.

Wie groß ist nun die Kraft, die notwendig ist, um die zulässige Biegespannung des Amalgames zu überschreiten?

Die Füllung wird wieder bei den ersten Molaren gelegt und die Kraft berechnet, die auf den Teil der Füllung entfällt, der nicht von Zahnhartsubstanz unterstützt ist.

Rechenbeispiel 1

Es wird angenommen, daß die einwirkende Kraft in Richtung auf die physiologische Zahnachse verläuft. Die Kraft, die in Punkt A auf die Füllung einwirkt, sei 0,5 mm von dem Teil der Füllung entfernt, der von Zahnhartsubstanz unterstützt ist. Daraus ergibt sich für das Biegemoment:
$M_b = F \cdot 0{,}5 \text{ mm}$

Die Präparationsbreite soll 3 mm im Bereich des gefährdeten Querschnitts betragen und die Höhe der Füllung 2 mm. Daraus ergibt sich für das Widerstandsmoment:
$W_b = bh^2/6 = 2 \text{ mm}^2$

$$\sigma_{bB} = \frac{F \cdot 0{,}5 \text{ mm}}{2 \text{ mm}^3}$$

Nach Tab. 3 liegen die Biegefestigkeiten etwa zwischen

$$\sigma_{bB} = 100 \text{ N/mm}^2$$

und $$\sigma_{bB} = 140 \text{ N/mm}^2$$

Daraus folgt nach obiger Formel:

$$F = 400 \text{ N} \approx 40 \text{ kp}$$

und $$F = 560 \text{ N} \approx 56 \text{ kp}$$

Es genügt eine Kaukraft von 40 kp bzw. 56 kp, um den Bruch der Füllung im Bereich des gefährdeten Querschnittes auszulösen.

H.SCHRÖDER und v. JANICKI haben nachgeprüft, daß zum Zerquetschen von verschiedenen Speisen zwischen den ersten Molaren verschiedene Kräfte notwendig sind:

Malzbonbons	41 - 56 kp	
Kristallwürfelzucker	35 - 40 kp	
Rindfleisch gekocht	39 - 47,5 kp	
Rindfleisch gebraten	24,8 - 30,2 kp	(20)

Der approximale Füllungsanteil einer Amalgamfüllung, deren Amalgamsorte aus Gruppe D Tab. 17 entstammt, kann unter Umständen beim Zerquetschen von Malzbonbons abgesprengt werden, wenn eine vertikale Kraft auf den von Zahnhartsubstanz nicht unterstützten Füllungsanteil einwirkt.

Rechenbeispiel 2

Die Zahnreihen sind durch einen hohen Bissen gesperrt. Die Richtung der einwirkenden Kraft stimmt nicht mit der Richtung der physiologischen Zahnachse überein. Die Präparationsbreite beträgt beim gefährdeten Querschnitt 3 mm und die Höhe der Füllung 2 mm, der Abstand von Punkt A zu B ist 2 mm lang. Daraus folgt: $M_b = F \cdot 2\ mm$, $W_b = 2\ mm^3$.

$\sigma_{bB} = 100\ N/mm^2$ $\quad F = 100\ N \approx 10\ kp$

$\sigma_{bB} = 140\ N/mm^2$ $\quad F = 140\ N \approx 14\ kp$

Rechenbeispiel 3

Es gelten die gleichen Voraussetzungen wie in Beispiel 2 mit Ausnahme der Präparationsbreite beim gefährdeten Querschnitt, die jetzt 2 mm und der Abstand von Punkt A zu B 3 mm betragen soll.

$\sigma_{bB} = 100\ N/mm^2$ $\quad F = 44,4\ N \approx 4,5\ kp$

$\sigma_{bB} = 140\ N/mm^2$ $\quad F = 62,2\ N \approx 6,25\ kp$

Trifft eine Kraft, die nicht senkrecht auf die physiologische Zahnachse verläuft, in einem Punkte auf der approximalen Randleiste auf, so kann deren Kraftgröße relativ klein sein, um ein Absprengen des approximalen Füllungsanteiles zu bewirken.

Natürlich ist eine Kraft, die horizontal an einem Zahne angreift, wesentlich geringer, als die Kraft, die in Richtung auf die physiologische Zahnachse verläuft.

Nach LEHMANN beträgt die maximale Horizontalkraft 1 kp, ohne daß Schäden im Desmodont auftreten. Die Vertikalkraft wird mit 70 kp angenommen, da bei 80 kp Schäden nach seiner Meinung nicht auszuschließen sind (17).

KÖRBER sieht dagegen Horizontalkräfte von maximal 2 kp und Vertikalkräfte bei Bruxismus von maximal 30 kp im Bereich des möglichen, ohne daß Schmerzen eintreten können (12).

Aufgrund dieser Angaben wurde von mir ein Kräftediagramm entwickelt, um die Kraft abzulesen, die überhaupt möglich ist, wenn Füllung und Zahn nicht achsengerecht belastet werden. Aus Abb. 38 erkennt man, daß die Kraft, die auf Füllung und Zahn von Seiten des Antagonisten einwirkt, enorm abnimmt, wenn der Kaukraftvektor nicht in Richtung auf die physiologische Zahnachse verläuft.

Eine Kraftabnahme, wie sie in Abb. 38 dargestellt ist, ist experimentell nicht nachgewiesen. Der Nachteil der Diagramme ist, daß die Belastungszeit außer Acht gelassen wird. Das Kräftediagramm soll hier lediglich plausibel machen, daß bei nicht achsengerechter Belastung von Füllung und Zahn die Kaukraft abnehmen muß, da sonst Schmerzen und Schäden im Desmodont auftreten würden wegen des Verlaufes und der Belastung der Fibrae dentoalveolares.

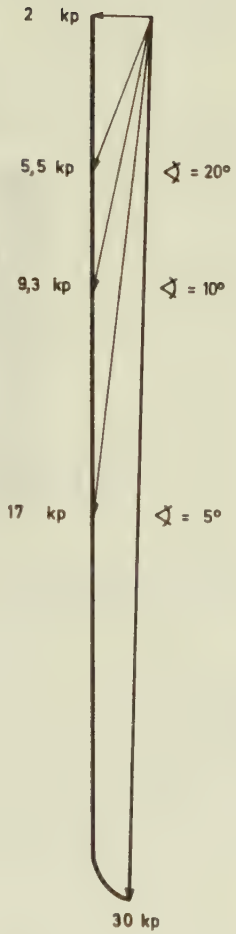

Abb. 38: Kräftediagramme

Abb. 39: Belastungsrichtung stimmt mit der Richtung der physiologischen Zahnachse nicht überein

In Rechenbeispiel 2 und 3 ist die Richtung der Kraft nicht exakt berücksichtigt worden, und dadurch kann über die Kaukraftmaxima keine Aussage gemacht werden. Möglicherweise liegen sie unter dem Wert der Kraft, der notwendig wäre, um die zulässige Biegespannung der Amalgamfüllung zu überschreiten.

Jedenfalls reproduziert der Biegeversuch im Laboratorium die klinischen Verhältnisse am besten. Das hat bereits MAHLER und MITCHEM 1964 (10) erkannt, und beide traten dafür ein, daß der Biegeversuch fester Bestandteil der Werkstoffprüfung für Amalgame wird und Berücksichtigung in der ADA-Specification Nr. 1 findet .

Vor allen Dingen läßt sich mit Hilfe des Biegeversuches das Absprengen der approximalen Füllungsanteile aufgrund der auftretenden Biegespannung am besten erklären. Weiter erweist sich die Form der Probekörper und deren Herstellung als sehr praxisnah.

7.4.1 Der Biegeversuch und die "Gamma 2"-freien Amalgame

Auf Seite 6 wird hervorgehoben, daß die "Gamma 2"-freien Amalgame durch eine hohe Druckfestigkeit neben einer ganzen Reihe von hervorragenden Eigenschaften auf sich aufmerksam machen. Betrachtet man dagegen Tab. 3 und 17, so muß man feststellen, daß die "Gamma 2"-freien Amalgame in Bezug auf ihre Biegefestigkeit niedrigere Werte als die konventionellen Amalgame ausweisen.

Beim Biegeversuch von spröden Materialien geht der Bruch der Probe immer von der Zugseite aus. Die Zugfestigkeit ist bei diesen Werkstoffen sehr niedrig, da sie sich bei Beanspruchung auf Zug nicht plastisch verformen können. Befindet sich nun im Bereich des gefährdeten Querschnittes beim Laboratoriumstest Biegefestigkeit oder bei Beanspruchung der Füllung im Munde auf Biegung eine große Anzahl an Poren, so kommt es zu einem frühzeitigen Bruch. Beim Druckversuch machen sich Poren im Innern des Gefüges nicht sehr negativ bemerkbar und beim Verformungsversuch "tensile strength" weniger bemerkbar als beim Biegeversuch. Deshalb läßt sich mit Hilfe des Biegeversuches im Laboratorium das Absprengen der approximalen Füllungsanteile im Munde des Patienten sehr gut erklären.

Bei Luxalloy non gamma 2 ist der Bruch der Probe frühzeitig aufgetreten, weil zwischen den Silber-Kupfer-Kugeln und der Umhüllungszone der intermetallischen Verbindung Cu_6Sn_5,η' zum Teil ein Spaltraum besteht. Der Werkstoff bricht beim Biegeversuch sehr schnell von der Zugseite her.

In Abb. 40 ist ein Teil des Bruchspaltes einer Probe von Luxalloy non gamma 2 beim Biegeversuch in 360-facher Vergrößerung dargestellt. Es handelt sich dabei um denselben Probekörper, der in Abb. 25 in 20-facher Vergrößerung dargestellt ist. Der Bruch zieht entlang den Spalträumen der Ag-Cu-Kugeln und deren Umhüllungszone. Es sind relativ wenig Ag-Cu-Kugeln direkt am Bruchspalt zu sehen, weil der größte Teil beim Bruch selbst herausgesprengt und verloren gegangen sein dürfte.

Durch Abb. 40 wird sehr eindrucksvoll demonstriert, daß nur die Normalspannung den Bruch ausgelöst hat. Schubkräfte sind in gleichem Maße wie Biegekräfte aufgetreten, da das Verhältnis $h/l = 0{,}333 \approx 0{,}566$ betragen hat (s. S.34). In unmittelbarer Umgebung des Bruchspaltes sind keine strukturellen Verschiebungen oder Deformationen zu erkennen, die auf Schubkräfte zurückzuführen wären. Die Ag-Cu-Kugeln werden hier von ihrer Umhüllungszone wie gewohnt umrundet, was als Beweis angesehen werden muß, daß nur die Biegespannung den Bruch ausgelöst hat.

Abb. 40: Bruchspalt eines Probekörpers in 360-facher Vergrößerung

8. ZUSAMMENFASSUNG

Aufgrund der Materialeigenschaften des Amalgames ist der Biegeversuch dem Druckversuch vorzuziehen. Beim Druckversuch sind die Meßwerte von der Probengestalt in hohem Maße abhängig, beim Biegeversuch spielt dagegen das Verhältnis h/l keine große Rolle, da der Bruch auf jeden Fall durch die auftretende Normalspannung verursacht wird. Der Verformungsversuch "tensile strength" reproduziert die klinischen Verhältnisse im Laboratorium besser als der Druckversuch; beide haben jedoch den Nachteil, daß hohe Kräfte notwendig sind, um einen Bruch der Probe auszulösen. Solche Kräfte können im Munde des Patienten niemals wirksam werden. Beim Biegeversuch ist die Kraft wesentlich geringer, die erforderlich ist, um die zulässige Spannung zu überschreiten, und sie ist im Munde des Patienten durchaus realisierbar. Der Biegeversuch ist deshalb ein sehr praxisnaher Verformungsversuch, weil beim spröden Amalgam der approximale Füllungsanteil aufgrund der einwirkenden Normalkraft und der daraus resultierenden Biegespannung abgesprengt wird. Kein anderer Verformungsversuch kann das Absprengen des approximalen Füllungsanteiles, das in der Praxis so oft beobachtet wird, im Laboratorium besser wiedergeben als der Biegeversuch. Ein weiterer Vorteil beim Biegeversuch ist durch den rechteckigen Querschnitt der Probekörper begründet, da der gefährdete Querschnitt der Amalgamfüllung, bei dem der Bruch eintritt, an eine solche Rechteckform erinnert.

Die Härteprüfung nach VICKERS ist für die zahnärztliche Werkstoffprüfung von Amalgamen bedeutungslos, weil bei Kenntnis der Vickershärte über die Haltbarkeit der Füllung im Munde nichts ausgesagt werden kann.

Der Biegeversuch sollte bei der Werkstoffprüfung von Amalgam unbedingt eingeführt werden und bei der Deutschen Norm Berücksichtigung finden.

Für die Hersteller von "Gamma 2"-freien Amalgamen muß die Kenntnis der Biegespannung von großem Interesse sein, da diese relativ niedrig sein kann im Gegensatz zu der Biegespannung der konventionellen Amalgame. Eine Verbesserung der Produkte in Bezug auf die Druckspannung und die Spannung St beim Verformungsversuch "tensile strength" ist nicht notwendig. Die heutigen hochwertigen Silberamalgame weisen diesbezüglich sehr hohe Festigkeitswerte aus.

Die Zahl der Ausreißer und die Größe der Standardabweichung sind beim Biegeversuch größer gewesen als beim Druckversuch. Das hängt damit zusammen, daß sich beim Biegeversuch Poren im Bereich des gefährdeten Querschnittes sehr stark auf die Festigkeit des Materials auswirken.

Auch bei korrekter Versuchsdurchführung beim Verformungsversuch "tensile strength" muß mit einer kleinen Differenz zwischen kleinstem und größtem Festigkeitswert gerechnet werden. Die Festigkeitswerte beim Druck- und Biegeversuch unterscheiden sich dagegen eindeutig.

Die aus dem statistischen Teil gewonnenen Daten müssen sehr vorsichtig interpretiert werden, wenn der Stichprobenumfang laut DIN 13904 bzw. ADA-Specification Nr. 1 lediglich 5 beträgt (1, 5). Will man mehrere Festigkeitswerte von Amalgamen miteinander vergleichen, so empfiehlt es sich, den Stichprobenumfang auf 10 Probekörper zu erhöhen und sich nicht nur des t-Tests zu bedienen, da dieser an Testschärfe erheblich verliert. Die Zahl der Ausreißer sollte nicht mehr als 2 von 10 betragen, sofern die Ermittlung nach DIN 13904 erfolgt.

Eine sorgfältige statistische Auswertung ist ebenso wichtig wie die Wahl der Prüfmethode und deren korrekte Durchführung.

9. LITERATURVERZEICHNIS

1. AMERICAN DENTAL ASSOCIATION: Guide to dental materials and devices, 6. Aufl. Chicago: American Dental Association 1972, S. 168-171

2. BUOCHÉ, CH., LEITNER, A. und SASS, F.: Dubbel-Taschenbuch für den Maschinenbau, 13. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1970, 1. Band S. 350, 351, 359, 360, 371, 386, 424, 425, 437

3. BÖGE, A.: Das Techniker Handbuch, 2. Aufl. Braunschweig: Vieweg und Sohn 1969, S. 421/422

4. BRITISH STANDARDS INSTITUTION: Specification for dental amalgam alloy (silver-tin), B.S. 2938: 1961, London: Baynard 1961, S. 1-8

5. DEUTSCHER NORMENAUSSCHUSS: Legierungen zum Herstellen von Amalgam (Vornorm DIN 13904 August 1975), Berlin, Köln: Beuth GmbH 1975, S. 1-5

6. DOLDER E. und MITARBEITER: Das Silberamalgam und die Probleme der Materialprüfung, Schweiz.Mschr.Zahnheilk. 71, 153-185 (1961)

7. DOMKE, W.: Werkstoffkunde und Werkstoffprüfung, 6. Aufl. Essen: Girardet 1975, S. 311, 312, 315, 316, 318

8. DREYER-JØRGENSEN, K.: Füllungsmaterialien, Quintess.zahnärztl.Lit. 5, 51 (1974)

9. FORSTEN, L.: Behandlingsmetodens och kondenseringstryckets inverkan på böjhållfastheten hos dentala amalgam, Suom.Hammaslääk.Toim. 66, 21-27 (1970)

10. FORSTEN, L.: Physical properties of dental amalgams, Turku: Forssan Kirjapaine Oy 1969, S. 39/40

11. INNES, D.B.K. and YOUDELIS, W.V.: Dispersion strenthened amalgams, J.Canad.Dent.Ass. 29, 587 (1963)

12. KÖRBER, KH.: Zahnärztliche Prothetik, Stuttgart: Thieme 1975, 1. Band S. 85, 87, 88, 92, 108, 109, 110, 119, 179

13. KREYSZIG, E.: Statistische Methoden und ihre Anwendung, 5. Aufl. Göttingen: Vandenhoeck & Ruprecht 1975, S. 37, 38, 234-242

14. KROPP, R.: Amalgame, in: Eichner, K.: Leitfaden zahnärztlicher Werkstoffe und ihrer Verarbeitung, 2. Aufl. Heidelberg: Hüthig 1970, S. 298

15. KROPP, R.: Amalgam in Theorie und Praxis, Zahnärztl.Prax. 24, 511-513 (1973)

16. KROPP, R.: "Gamma 2"-freies Amalgam - ein neuer Werkstoff für die Zahnerhaltungskunde, Zahnärztl. Welt/Ref. 85, 23-26 (1976)

17. LEHMANN, K.: Einführung in die Zahnersatzkunde, München, Berlin, Wien: Urban & Schwarzenberg 1975, S. 25

18. MACHERAUCH, E.: Praktikum für Werkstoffkunde, Braunschweig: Vieweg und Sohn 1970, S. 47, 70, 71

19. MAHLER, D.B., ADEY, J.D. and EYSDEN, J. van: Quantitative microprobe analysis of amalgam, J.dent.Res. 54, 218 (1975)

20. MEYER, W.: Die Zahn-, Mund- und Kieferheilkunde, München, Berlin: Urban & Schwarzenberg 1958, S. 426, 427

21. MEYER, W.: Physiologie der Mundhöhle, in: Port-Euler: Lehrbuch der Zahnheilkunde, 6. Aufl. München: Bergmann 1951, S. 135

22. MÖRIKE, K.D.: Lehrbuch der makroskopischen Anatomie für Zahnärzte, Stuttgart: Fischer 1969, S. 45

23. RIETHE, P.: Alchimistische Symbole für Amalgam, Zahnärztl.Mitt. 22, 109-113 (1971)

24. RIETHE, P.: Die Quintessenz der Amalgamanwendung, Berlin: Quintessenz 1971, S. 13, 21, 36, 23-75

25. SACHS, L.: Angewandte Statistik, 4. Aufl. Berlin, Heidelberg, New York: Springer 1974, S. 94, 96-106, 235-240, 384, 385, 391-394

26. SIEBEL, E.: Handbuch der Werkstoffprüfung - Die Prüfung der metallischen Werkstoffe, 2. Aufl. Berlin, Göttingen, Heidelberg: Springer 1955, 2. Band S. 94, 98, 109, 110, 113, 115

27. STANDARDS ASSOCIATION OF AUSTRALIA: Australian standard specification for dental amalgam alloy, Sydney: Association Science House 1949, S. 1-6

28. WEBER, E.: Grundriß der biologischen Statistik, 6. Aufl. Stuttgart: Fischer 1967, S. 251, 252, 501-507

An dieser Stelle möchte ich meinem verehrten Lehrer Herrn Prof.Dr.Dr. P.Riethe meinen Dank aussprechen für die Oberlassung des Themas und seine wertvolle Unterstützung, sowie für das rege Interesse, das er dieser Arbeit stets entgegenbrachte.

Ferner danke ich dem Wissenschaftlichen Mitarbeiter der Firma Degussa Pforzheim, Herrn Dr. R.Kropp und der Firma Degussa für die Oberlassung des Prüfmaterials, Einrichtungsgegenstände u.a., die zur Durchführung meiner Versuche notwendig waren.

Herrn G.Schubring vom Zentrum für Datenverarbeitung in Tübingen gilt mein Dank für die Durchsicht des mathematischen Teils dieser Arbeit und seinen unentbehrlichen Rat.

LEBENSLAUF

Am 1.9.1949 wurde ich, Karl-Heinz, Emil Diefenbacher, als Sohn des Schreiners Otto Diefenbacher und dessen Ehefrau Hedwig geb. Haug in Pforzheim geboren.

1956 wurde ich in der Nordstadtschule I in Pforzheim als Schulanfänger eingestuft, 1964 besuchte ich die 3-jährige Höhere Handelsschule und danach das Fritz-Erler-Wirtschaftsgymnasium in Pforzheim, an dem ich am 24.6.1969 die Reifeprüfung absolvierte.
Danach studierte ich Physik und Volkswirtschaft an der Universität Fridericiana zu Karlsruhe, wo ich am 10.5.1972 die Diplom-Vorprüfung für Technische Volkswirte ablegte.

Nach vielen erfolglosen Bewerbungen bekam ich schließlich zum SS 1973 meine Zulassung zum Studium der Zahnmedizin an der Eberhard-Karls-Universität Tübingen. Nachdem ich am 22.3.1974 die naturwissenschaftliche Vorprüfung für Zahnärzte und am 10.10.1975 die zahnärztliche Vorprüfung bestand, schloß ich mein Studium mit bestandenem Staatsexamen am 7.Juni 1978 ab.